

UNTERSUCHUNG DES THERMISCHEN VERHALTENS
VON HOLZ UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DES EINFLUSSES
HYGROSKOPISCH GEBUNDENER FEUCHTIGKEIT

Von der Fakultät für Maschinenbau und Elektrotechnik
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina
zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde eines
Doktor - Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

Dissertation

von
Frank Hoffmann
aus Holzminden

Eingereicht am :	10. 5. 1979
Mündliche Prüfung am :	16. 7. 1979
Berichterstatter :	Prof. Dr.-Ing. H.J.Löffler
Mitberichterstatter :	Prof. Dr. techn. R.Dolezal

1979

UB Braunschweig

84



2552-643-3

-

UNTERSUCHUNG DES THERMISCHEN VERHALTENS
VON HOLZ UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DES EINFLUSSES
HYGROSKOPISCH GEBUNDENER FEUCHTIGKEIT

Von der Fakultät für Maschinenbau und Elektrotechnik
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina
zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde eines
Doktor - Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

Dissertation

von
Frank Hoffmann
aus Holzminden

Eingereicht am :	10. 5. 1979
Mündliche Prüfung am :	16. 7. 1979
Berichterstatter :	Prof. Dr.-Ing. H.J.Löffler
Mitberichterstatter :	Prof. Dr. techn. R.Dolezal

1979

Universitätsbibliothek
der
Technischen Universität
Braunschweig

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Sonderforschungsbereich 148 - Brandverhalten von Bauteilen - am Institut für Wärme- und Brennstofftechnik der Technischen Universität Braunschweig.

An dieser Stelle möchte ich allen, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, danken.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.techn. R. Dolezal, der die Arbeit anregte und mir bei der Durchführung stets fördernd zur Seite stand. Herrn Prof. Dr.-Ing. H.J. Löffler danke ich für sein Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Referats.

Weiterhin gilt mein Dank der Deutschen Forschungsgemeinschaft, durch deren finanzielle Unterstützung diese Arbeit ermöglicht wurde.

Braunschweig, im Herbst 1979

Frank Hoffmann

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Formelzeichen	VII
1. Einleitung	1
1.1 Einführung in die Grundproblematik	1
1.2 Gegenstand und Ziel der Arbeit	2
2. Kenntnisstand	3
2.1 Der Einfluß der Eigenschaften von Hölzern auf ihr thermisches Verhalten	4
2.1.1 Der Einfluß der Struktur	4
2.1.2 Einfluß der chemischen Zusammensetzung	10
2.1.3 Einfluß der Einlagerungen	12
2.2 Untersuchungen zur Pyrolyse von Holz	15
2.2.1 Experimentelle Untersuchungen	16
2.2.2 Mathematisch-physikalische Untersuchungen	20
3. Das mathematisch-physikalische Modell	22
3.1 Allgemeine Beschreibung	22
3.2 Die mathematisch-physikalische Beschreibung	26
3.2.1 Der Wärmeübergang	27
3.2.2 Die instationäre Massenbilanz für das Gas	30
3.2.3 Gesetz von Darcy	32
3.2.4 Die instationäre Energiebilanz	35
3.2.5 Die Stoffwerte	41
3.2.5.1 Die Dichte	41
3.2.5.2 Die spez. Wärmekapazität	47
3.2.5.3 Die Wärmeleitfähigkeit	50
3.2.6 Der Einfluß von Quellen und Senken auf den Auf- heizprozeß	56
3.3 Lösungsmethode und Rechenprogramm	59
4. Experimentelle Untersuchungen	62
4.1 Die Versuchseinrichtung	63
4.1.1 Ofen und Vorkammer	63
4.1.2 Die Meßeinrichtung	65

4.1.3	Meßgenauigkeit	67
4.2	Aufbau und Vorbereitung der Probe	69
4.3	Versuchsbedingungen und -durchführung	71
4.4	Versuchsauswertung	72
4.4.1	Temperaturmessungen	72
4.4.2	Diskontinuierliche Untersuchungen	72
5.	Diskussion der Ergebnisse	74
5.1	Meßergebnisse	74
5.2	Vergleich der Messungen mit dem mathematischen Modell	80
5.3	Studium des Feuchtigkeitseinflusses mit dem mathematischen Modell	87
6.	Zusammenfassung und Ausblick	96
7.	Literaturverzeichnis	99
8.	Anhang	108

Formelzeichen

Lateinische Großbuchstaben

A	Fläche
A_K	Konvektionsterm nach /45/ (Gl. 3.2-35)
C_i	Konstanten
C_S	Strahlungskoeffizient des schwarzen Körpers
D_{Diff}	Diffusionskoeffizient
E	Aktivierungsenergie
G	Gewicht
Gr	Grashof-Zahl
Nu	Nusselt-Zahl
Pr	Prandtl-Zahl
R	Gaskonstante
R	universelle Gaskonstante
Re_l	charakteristische Re-Zahl (Gl. 3.2-30)
T	absolute Temperatur
V	Volumen

Lateinische Kleinbuchstaben

b	Expansionskoeffizient für Quellung
c	spez. Wärmekapazität
d	Durchmesser
g	Gravitationskraft/Masse
h	spez. Enthalpie
k	Reaktionsgeschwindigkeit
k_o	Häufigkeitsfaktor
l	Länge
m	Masse
\dot{m}	Massenstrom
n	Reaktionsordnung
p	Druck
q	Wärme/Volumen
\dot{q}	Wärmestromdichte
q_Z	Zersetzungsenthalpie in kJ/kg
r	Verdampfungsenthalpie
u	Feuchtigkeit
\hat{Q}	spez. innere Energie

Griechische Buchstaben

α	Wärmeübergangskoeffizient
β	Wärmeausdehnungskoeffizient
$\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_{12}$	Emissionsverhältnisse
$\epsilon_f, \epsilon_w, \epsilon_g$	Partialvolumen/Gesamtvolumen
η	dynamische Viskosität
ϑ	Temperatur in °C
κ	Permeabilität
λ	Wärmeleitfähigkeit
ξ	Größe allgemein
ρ	Dichte
τ	Zeit
τ_{xx}	Schubspannung
ϕ	Quellterm
φ	Winkelverhältnis
φ_u	relative Feuchte
ψ_i	Faktoren aus /60/

Indizes

C	Kohle
D	Dampf
d	Darrzustand
f	fest
fK	freie Konvektion
g	Gaszustand
ges	gesamt
H	Holz
hyg	hygroskopisch
K	Konvektion
kond	kondensiert
L	Leitung
O	Oberfläche
p	prozentual
q	Energiebilanz
R	Umgebungsatmosphäre
S	Strahlung

s	Siedezustand
T	Trocknung
t	trocken
Tol	Toluol
U	Umgebung
u	feucht
v	volumenbezogen
w	Wasser
Z	Zersetzung
α	Anfangszustand
ω	Endzustand

1. Einleitung

1.1 Einführung in die Grundproblematik

Der Betrachtung des thermischen Verhaltens von Holz kommt neben der industriellen Verarbeitung (Trocknung, Härtung, Spanplattenherstellung und Gewinnung chemischer Produkte) eine besondere Bedeutung im brandtechnischen Bereich zu. Das bezieht sich nicht nur auf seinen Einsatz als Teil von Bauten oder deren Einrichtung, sondern in stärkerem Maße noch auf seine Verwendung als Brandgut zur Simulation "natürlicher Brände" .

Systematische Untersuchungen realer Brandfälle lassen sich mit zusammengesetzten Brandlasten aus verschiedenen Stoffen, wie sie zumeist bei Schadensfeuern vorliegen, nicht durchführen. Die dabei auftretenden Brandcharakteristiken wären wegen der unterschiedlichen Eigenschaften der beteiligten Stoffe von einer zu großen Anzahl von Parametern abhängig. Die Durchführung solcher Untersuchungen ist jedoch unerlässlich, um einerseits die vorhandenen genormten Brandprüfverfahren für Bauteile /16,17/ an die Gesetzmäßigkeiten natürlicher Brände anpassen zu können und andererseits den Einfluß der bauseitig gegebenen Voraussetzungen (Raumgeometrie, Fenster, Lüftungsschächte usw.) abschätzen zu können.

So wurden im nationalen und internationalen Bereich neben einer Vielzahl von Einzeluntersuchungen auch Großprogramme zum Studium von Holzbränden mit Krippenkonfigurationen unterschiedlicher Geometrie und Verteilung bei verschiedenen Brandraumeigenschaften durchgeführt /22, 83/ . Diese Untersuchungsmethode hat zwei Vorteile gegenüber einer Untersuchung mit realen Brandlasten, ein einheitliches Grundmaterial für die Brandlast und Möglichkeiten zur systematischen Veränderung ihrer Geometrie.

Eine systematische Darstellung gelang jedoch bis heute nicht, da die Wechselbeziehungen zwischen Brandgut und Brandraum einerseits und den einzelnen Krippenelementen untereinander andererseits noch unzureichend bzw. gar nicht bekannt sind. Das Verhalten der einzelnen Elemente der Brandlast hängt vom Wärme- und Stoffübergang innerhalb der Krippe und von den Eigenschaften des Holzes selbst ab. Außerdem wurde bei den be-

kannten Krippenbrandversuchen dem Einfluß der Feuchtigkeit der verwendeten Hölzern wenig Aufmerksamkeit gewidmet.

Hier stellt sich die Frage, ob und in welchem Maße die Feuchtigkeit einen Einfluß auf das thermische Verhalten von Holz bei für den Brand typischen Aufheizbedingungen hat.

Wegen des geringen Kenntnisstandes der Vorgänge im Holz während der Aufheizphase ist es sinnvoll, diese Problematik erst einmal am Einzelkörper zu studieren.

1.2 Gegenstand und Ziel der Arbeit

Untersuchungen des thermischen Verhaltens von Holz wurden bisher in vielfältiger Weise durchgeführt, wobei jeweils unterschiedliche Aspekte wie Aufheiz-, Zersetzungs-, Zünd- und Abbrandverhalten oder aber die Abhängigkeiten einzelner Stoffwerte oder reaktionskinetischer Daten vom jeweiligen Materialzustand untersucht wurden.

Dabei zeigte sich, daß eine einheitliche Darstellung der Ergebnisse bis heute nicht möglich ist, da der Untersuchungsgegenstand je nach Art, Entstehungszeit und Vorbehandlung (Lagerung, Trocknung usw.) in verschiedener Struktur und Zusammensetzung vorliegen kann.

Weiterhin wurden unterschiedliche Untersuchungsmethoden mit verschiedenen Rand- und Anfangsbedingungen verwendet, die zum Teil erhebliche Differenzen in den Ergebnissen erbrachten /7,41,76/. Deshalb wurde schon frühzeitig erkannt, daß neben experimentellen Untersuchungen mathematisch - physikalische Ansätze erforderlich sind, um die vorhandenen Ergebnisse einordnen und systematisieren zu können.

Dabei stellte sich bald heraus, daß die ersten Modelle zu einfach waren, um dieser Forderung gerecht zu werden.

So wurden in der Folgezeit eine Reihe von Ansätzen für verschiedene

Probleme mit unterschiedlichen Schwerpunkten erstellt, in die die vorhandenen experimentellen Ergebnisse eingebaut wurden, soweit eigene nicht vorlagen.

Diese Modelle unterschieden sich im Wärmeübergang, den Rand- und Anfangsbedingungen und den Vereinfachungen sowie in der Berücksichtigung der Veränderlichkeit der Stoffwerte.

Fast alle Modelle beschränken sich auf die Beschreibung der Vorgänge während der Aufheiz- und Zersetzungsphase, d.h. daß Zünd- und Abbrandbedingungen nicht berücksichtigt sind. Außerdem wurde generell von ideal trockenem Stoff ausgegangen. Diese Bedingung dürfte jedoch bei den experimentellen Untersuchungen auch bei guter Trocknung nicht erfüllt sein, so daß hier sicherlich ein Einfluß auf die Ergebnisse vorhanden sein wird.

Ziel der hier vorgelegten Arbeit ist es, ein mathematisch - physikalisches Modell für Holz zum Studium des Einflusses der sorptiv gebundenen Feuchtigkeit auf die bei thermischer Belastung entstehenden Änderungen von Stoff und Zustand zu entwickeln, wobei von Erkenntnissen früherer Modelle ausgegangen wird.

Ein Vergleich der berechneten Ergebnisse mit experimentell ermittelten soll zeigen, inwieweit das entwickelte Modell den realen Vorgängen folgen kann.

2. Kenntnisstand

Die Kenntnisse des thermischen Verhaltens von Holz entstammen Untersuchungen, die einerseits explizit die Transport- und reaktionskinetischen Eigenschaften von Holz und andererseits sein Gesamtverhalten bei thermischer Belastung unter vorgegebenen Rand- und Anfangsbedingungen betreffen. Dabei läßt sich der jeweilige Gesamtprozeß ohne Kenntnis der bei thermischer Beanspruchung relevanten Stoffwerte nicht bewerten, zumal in der Regel eine gegenseitige Beeinflussung vorliegt.

2.1 Der Einfluß der Eigenschaften von Hölzern auf ihr thermisches Verhalten

Holz ist der Begriff für inhomogene, pflanzliche Stoffe, die sich aus den entrindeten Stämmen, Ästen und Wurzeln von Bäumen und Sträuchern zusammensetzen /49/ . Die Stoffe können durch folgende grundlegende Unterscheidungsmerkmale, aus denen sich ihre Eigenschaften ergeben, charakterisiert werden:

- A. Struktur
- B. chemische Zusammensetzung
- C. Einlagerungen

Dabei richten sich die speziellen Merkmale eines Holzes nach seiner Vorgeschichte, die durch eine Reihe von Voraussetzungen bestimmt wird:

- a. Baumart
- b. Standort
- c. Alter
- d. Klimatische Bedingungen
- e. Teil des Baumes
- f. Jahreszeit der Entstehung
- g. Vorbehandlung

Die Einbeziehung der Gesamtheit dieser Einflußfaktoren in die Betrachtung des thermischen Verhaltens gestaltet sich dabei äußerst schwierig, da nur umfangreiche Analysen Aufschluß über die Charakteristik eines Holzkörpers geben können. Außerdem ist zu berücksichtigen, daß bei größeren Holzkörpern annähernd einheitliche Eigenschaften nicht mehr vorliegen können. Demnach muß eine allgemeine Untersuchung des Gesamtprozesses sich auf die augenfälligen Merkmale beschränken, die sich in erster Linie aus der Baumart und dem Holzzustand ergeben.

2.1.1 Der Einfluß der Struktur

Das deutlichste Unterscheidungsmerkmal bei Hölzern ist ihre Struktur,

wobei zwischen Nadel- und Laubhölzern unterschieden wird.

Der einfache Aufbau der Nadelhölzer ist aus Abb. 2.1 ersichtlich. Sie besitzen eine sehr gleichmäßige Struktur, die hauptsächlich durch große Leitzellen, die Tracheiden, gebildet wird, wobei das Frühholz großlumige und das Spätholz enge, festigkeitsfördernde Zellen aufweist. Parallel

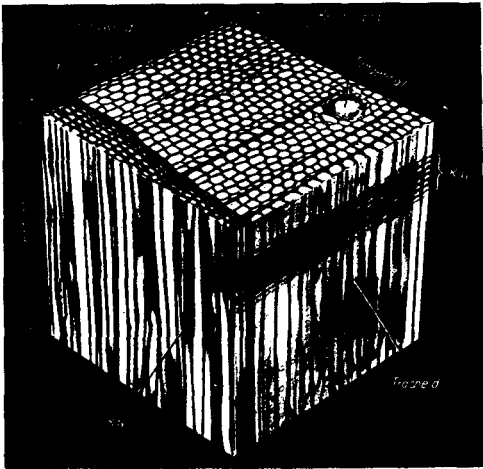


Abb. 2.1 :
Photomikrographisches
Modell eines Nadel-
holzes /55/ mit
Tracheiden, Markstrah-
len und Harzkanal

dazu verlaufen ebenfalls in axialer Richtung bei vielen Nadelholzarten Harzkanäle, während radial Markstrahlen angeordnet sind, die überwiegend Speicherzellen beinhalten.

Die wesentlich differenziertere Struktur der Laubhölzer (Abb. 2.2) ist auf die höhere Entwicklungsstufe dieser Holzarten zurückzuführen. Hier liegt ein poriger Aufbau vor, der durch kleinere Leitzellen, die Gefäße oder Tracheen, gebildet wird, wobei wiederum die weiten im Frühholz und die engen im Spätholz zu finden sind.

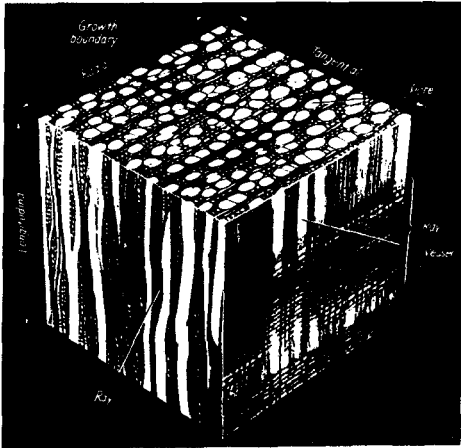


Abb. 2.2 :
Photomikrographisches
Modell eines Laubholzes
/55/ mit Tracheen, und
Markstrahlen.

Dabei erfolgt der Übergang bei den zerstreutporigen Holzarten stetig, während bei den ringporigen eine plötzliche Änderung vorliegt. Die Markstrahlen verlaufen in breiteren und formenreicheren Bändern als beim Nadelholz, Harzkanäle fehlen.

Die Verschiedenheit der Struktur der einzelnen Hölzer wird aus Tabelle 2.1 deutlich, da sie sich aus den unterschiedlich vorliegenden Anteilen von Gewebearten am Gesamtkörper ergeben.

Diese Zusammenstellung verdeutlicht nicht nur die starken Unterschiede zwischen den beiden großen Baumarten, sondern zeigt gleichzeitig, daß auch innerhalb jeder dieser Gruppen eine große Streuung der Gewebeanteile auftritt. Daraus muß gefolgert werden, daß Untersuchungen des Holzverhaltens in einem Prozeß, der thermischer oder mechanischer Natur sein kann, ohne eine genaue Charakterisierung nach den in Kap. 2.1 angegebenen Kriterien nur qualitativen Charakter haben können.

Gewebeart	Nadelholz Volumenanteil in %			Laubholz Volumenanteil in %		
	kleinster	mittlerer	größter	kleinster	mittlerer	größter
Gefäße (Tracheen)	-	-	-	2	15	65
Tracheiden (Leitzellen)	87	93	96	-	-	-
Libriform (Hartfasern)	-	-	-	13	55	80
Parenchym (Speicherzellen)	Spuren	1	2	2	12	75
Markstrahlen	4	7	12	1,2	15	50
Harzkanäle	-	0,4	1,1	-	-	-

Tabelle 2.1 : Anteil der verschiedenen Gewebe am Holzkörper /49/ .

Die Struktur beeinflusst Darrdichte und Transporteigenschaften sowie Art und Umfang der Einlagerungen.

Die Darrdichte ist die Dichte des trockenen Körpers, d.h. daß sie sich aus Zellwand, davon eingeschlossenem Gas und nichtwässrigen Einlagerungen zusammensetzt. Ihre Strukturabhängigkeit ergibt sich aus dem Verhältnis von Hohlraum zu Darrvolumen, das als Porosität bezeichnet wird. Die Transporteigenschaften hängen nicht nur von der Darrdichte, sondern auch von der Lage der Holzfaser zur Transportrichtung ab. Hier werden drei Schnittlagen durch einen Stamm als charakteristisch angesehen, der Tangential-, Radial- und Hirnschnitt. Die Lage des Schnittes geht aus Abb. 2.3 hervor.

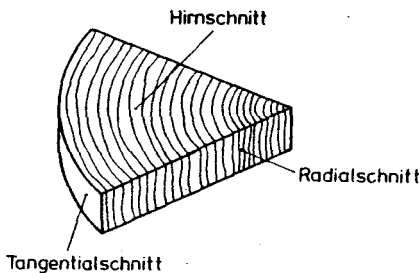


Abb. 2.3 :
Typische Schnittlagen
durch das Holz.

Dabei weisen die Transportwiderstände sowohl für den Wärme- als auch den Massentransport durch diese Schnittlagen die gleiche Tendenz auf, obwohl die Ursachen gegensätzlich sind. Während der Wärmetransport überwiegend durch Leitung durch die Zellwand erfolgt, da das eingeschlossene Gas ein schlechter Wärmeleiter ist, wird der Massenstrom durch die Hohlräume des Körpers geführt.

Daraus folgt unmittelbar, daß die Transportwiderstände in Faserrichtung, also durch den Hirnschnitt, am kleinsten sein müssen, denn einerseits kann die Wärme über die ganze Faserlänge geleitet werden und andererseits kann der Massenstrom über die Wege der Saftleitung fließen. So ergeben sich parallel zur Faser wesentlich höhere Permeabilitäten und Wärmeleitfähigkeiten als senkrecht dazu. Die Wärmeleitfähigkeit längs der

Faser ist etwa doppelt so groß /37/, wobei Griffith und Kaye /30/ für radiale Leitfähigkeiten 5 bis 10 % höhere Werte als bei den tangentialen ermittelten.

Der Einfluß von Fehlstellen wurde von MacLean /64/ untersucht. Dabei ergaben sich ansteigende Werte bei großen Aststellen oder sich stark ändernden Faserrichtungen. Wesentlich größer scheinen die Differenzen bei den Permeabilitäten zu sein, obwohl darüber nur wenige Untersuchungen vorliegen. Die von Lee und Smith /84/ gemessenen axialen Permeabilitäten zeigten große Streuungen bis zum Faktor 3000 (*Tectona grandis*) bei Laubhölzern und 39 (*Pinus sylvestris*) bei Nadelhölzern. Darüberhinaus wiesen sie für Buche ein Verhältnis von radialem zu axialem Transport von etwa $1 : 4.3 \times 10^4$ nach. In Hinsicht auf den tangentialen Transport liegt dieses Verhältnis noch ungünstiger wie aus Tabelle 2.2 zu ersehen ist. Diese Ergebnisse werden in /36/ bestätigt. Da mit dem Massentransport ein Energietransport verbunden ist, wirkt sich die Permeabilität unmittelbar auf das thermische Geschehen im Körper aus.

Strömungsrichtung	Permeabilität (darcys) ¹⁾
Tangential	3.63×10^{-4}
Radial	5.44×10^{-4}
Axial	23.57

Tabelle 2.2 : Berechnete Permeabilität für 20 °C nach /84/ .

1) Die Einheit 1 darcy für die Permeabilität entstammt der amerikanischen Literatur. Die Umrechnung in das MKSA - System erfolgt folgendermaßen:

$$1 \text{ darcy} = 1 \frac{\text{cm}^3 \text{ cP}}{\text{cm}^2 \text{ at/cm}} = 1.01 \times 10^{-12} \text{ m}^2 / 66/$$

Diese Einheit wird im Folgenden aus Gründen der Übersichtlichkeit und Vergleichbarkeit mit der angelsächsischen Literatur weiterverwendet.

2.1.2 Einfluß der chem. Zusammensetzung

Die chemische Zusammensetzung wirkt sich im thermischen Verhalten von Holz hauptsächlich auf die Reaktionskinetik aus, da durch Einwirkung von Wärme eine Zersetzung der chemischen Komponenten stattfinden kann. Sie ist abhängig von den Anteilen der einzelnen Komponenten am Gesamtkörper sowie der Dauer und Größe des eintretenden Wärmestromes. Die Hauptbestandteile des Holzes sind Kohlehydrate, Zellulose und Lignin. Ihre Anteile werden über Analysenverfahren bestimmt, die weder einheitlich noch exakt sind /49/. Trotzdem lassen die vorliegenden Analysen im Vergleich erkennen, daß die einzelnen Holzarten untereinander zum Teil deutliche Unterschiede aufweisen, wie aus einer Zusammenstellung von Timell /91/ für 5 Laub- und 5 Nadelhölzer hervorgeht.

Komponente	Nadelhölzer	Laubhölzer
	%	
Zellulose	41 ± 42	42 ± 51
Lignin	27 ± 33	19 ± 24
Kohlehydrate	26 ± 32	25 ± 39

Tabelle 2.3 : Prozentuale Anteile der Holzkomponenten nach Timell /91/

Darüberhinaus erhielten Jayme und Blischnok /39/ stark differierende Ergebnisse aus der Analyse einzelner Teile einer Baumart (Kiefer), die in Abb. 2.4 wiedergegeben sind.

Diese Inhomogenitäten müssen sich auf das Zersetzungsverhalten von Holz auswirken, da die thermische Zersetzung der Einzelkomponenten unterschiedlich abläuft. Dazu fanden Stamm /88/ , Sandermann und Augustin /81/ und Mitchell u.a. /68/ bei Versuchstemperaturen $\geq 220^{\circ}\text{C}$, daß die thermische Zersetzung der Einzelkomponenten in der Reihenfolge Kohlehydrate - Zellulose - Lignin abläuft, wobei nach Roberts /76/ die Zellulose den größten Einfluß auf die Reaktionskinetik hat.

Obwohl die Ergebnisse aus Untersuchungen mit Holzextrakten nicht unbedingt auf Holz übertragbar sind /93/ , geben sie doch Anhaltspunkte

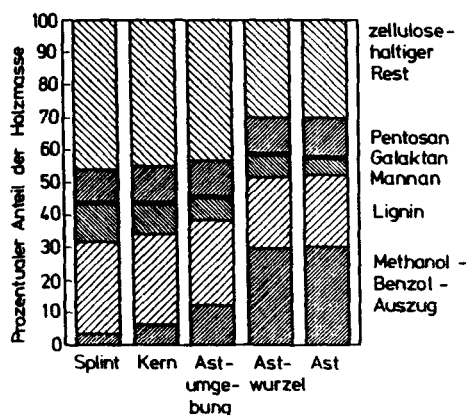


Abb. 2.4 :
Chemische Zusammen-
setzung der verschie-
denen Teile des Kiefern-
holzes nach /39/ .

für eine Bewertung, zumal Domanský und Rendoš /20/ auf Grund von DTA - Untersuchungen zeigen konnten, daß sich ein Gemisch aus den Einzelkomponenten des Buchenholzes bei gleichen Anteilen wie das Holz selbst verhält.

Die aufgenommenen Thermogramme, die das Verhalten der Reaktionsenthalpie wiedergeben, zeigen in der Tendenz für Lignin und Kohlehydrate einen ähnlichen Verlauf. Nach anfänglichem endothermen Verhalten, das mit der Abspaltung von Wasser erklärt wird /24/ , erfolgt bei etwa 215 °C ein Umschlag in exothermes Verhalten. Bei Zellulose hingegen ergibt sich bei etwa 320 °C noch einmal ein Übergang zu endothermem Verhalten, das bei etwa 380 °C beendet ist. Eickner /24/ ermittelte in diesem Bereich den Hauptanteil des Gewichtsverlustes von Zellulose.

Unter der Berücksichtigung der beschriebenen Vielfalt in der Zusammensetzung von Hölzern und verschiedenen Versuchsbedingungen ist es einzusehen, daß die in der Literatur wiedergegebenen reaktionskinetischen Daten und Reaktionsenthalpien starken Streuungen unterliegen. Hier fehlen systematische Untersuchungen besonders bei Temperaturen über 200 °C .

2.1.3 Einfluß der Einlagerungen

Die Einlagerungen können unterschiedlicher Natur sein. So liegen im Holz Harze, Fette, Wachse und Teere vor, die sich auf den Verbrennungsvorgang stützend auswirken. Allerdings ist ihr Einfluß auf die thermische Zersetzung bei hohen Aufheizgeschwindigkeiten noch nicht geklärt.

Dagegen wirkt sich die Feuchtigkeit auf beide Vorgänge hemmend aus, da ihre Beseitigung mit einem Wärmeverbrauch verbunden ist. Dieser Einfluß läßt sich aus der Einbindung des Wassers in die Zellstruktur des Holzes erklären.

Holz ist ein hygroskopischer Stoff, d.h. daß unmittelbar über seiner Oberfläche Dampfdrücke auftreten, die kleiner sind als der Sättigungsdruck /58/. Dieses Phänomen resultiert aus den Bindungsvorgängen des Wassers, die Kollmann /49/ grob in drei Bereiche eingeteilt hat, die Chemosorption, Adsorption und Kapillarkondensation.

Die Chemosorption ist durch eine chemische Bindung der negativ gepolten freien Hydroxylgruppen der Zellwand mit den positiven Polen der Wassermoleküle, die diese durch ihren dipolartigen Aufbau besitzen, gekennzeichnet. An die so gebundenen Moleküle lagern sich wechselseitig weitere an, so daß eine monomolare Schicht entsteht. Das Ende der Chemosorption ist nach Absättigung aller Hydroxylgruppen erreicht. Dieser Zustand liegt bei einer Feuchtigkeit, die durch den Quotienten aus der Masse des eingelagerten Wassers und des gedarrten Holzes definiert ist, von etwa $u = 0.06 \div 0.08$ /53/.

Eine weitere Anlagerung von Wassermolekülen erfolgt durch Adsorption, die auf Grund Van der Waals'scher Kräfte hervorgerufen wird /6/. Sie führt zu mehreren Schichten, die letztlich die im Holz vorhandenen Kapillaren auffüllen und eine geschlossene, gekrümmte Grenzfläche, den Meniskus, bilden. Eine weitere Einbindung erfolgt auf Grund des Kapillardruckes durch Kapillarkondensation, deren Einfluß ab $u = 0.15$ spürbar zunimmt /49/. Der beschriebene Ablauf in den angegebenen Feuchtigkeitsbereichen bedeutet nach Stamm /89/ jedoch nicht, daß nicht schon in submikroskopischen Kapillaren ($10^{-9} \div 10^{-8}$ m) bei geringen Feuchtigkeiten ($u < 0.06$) Kapillarkondensation auftreten kann. Bei Abschluß aller Sorptionsvorgänge, der nach Trendelenburg /94/ je nach Holzart bei

$0.22 \leq u \leq 0.35$ liegt, ist der Fasersättigungspunkt erreicht. Die durch die Sorption erfolgte Anlagerung von Wassermolekülen bewirkt einerseits eine Aufweitung der Zellwand, die Quellung, und andererseits eine Verdichtung der Wassermoleküle, die im Bereich der Chemosorption am größten ist, wie aus einer Darstellung von Stamm /87/ zur Feuchtigkeitsabhängigkeit der Dichte sorbierten Wassers hervorgeht.

Die Verdichtung ist mit einer Bewegungshemmung der Moleküle verbunden, die sich im Freiwerden von Bewegungsenergie, der Quellungsenergie, äußert. Stamm und Loughborough /86/ errechneten für den Bereich der chemisorption demnach auch die höchsten differentiellen Quellungsenergien. Die Berechnung läßt sich näherungsweise mit einem empirischen Ansatz von Katz /43/ durchführen, für den Kollmann /48/ die erforderlichen Konstanten ermittelt hat, wobei das unterschiedliche Sorptionsverhalten der einzelnen Holzarten nicht berücksichtigt wird. Die Erwärmung des feuchten Holzes führt zu einer Umkehr der beschriebenen Vorgänge.

Die Entfeuchtung ist ein endothermer Vorgang, da zur Verdampfung des eingebundenen Wassers die Verdampfungsenthalpie erforderlich ist. Der sorbierte Anteil benötigt darüberhinaus die bei der Quellung verlorene Bewegungsenergie, so daß in diesem Bereich die Endothermizität zunimmt. Außerdem wird durch die Entfeuchtung die Aufweitung der Zellstruktur rückgängig gemacht, so daß Schrumpfung eintritt. Dieser Prozeß verläuft jedoch anders als die Quellung, da er nicht nur mit einem Hystereseeffekt behaftet ist, sondern auch unter anderen Zustandsbedingungen abläuft. So erfährt ein Holzkörper bei hohen Aufheizgeschwindigkeiten auf Grund von Schwindspannungen und -rissen nach Kollmann /49/ ein geringeres Schwindmaß als bei langsamer Trocknung, wobei die Quellung und somit auch die Schwindung richtungsabhängig sind, wie Vorreiter /98/ nachgewiesen hat.

Nach der Überführung des Wassers in den Dampfzustand erfolgt je nach Randbedingungen der Transport durch Diffusion, Dampfströmung oder kapillare Wasserbewegung. Dampfströmung findet dort statt, wo der Dampf mit anderen Gasen wie Luft oder Zersetzungsprodukten nicht vermischt ist. Untersuchungen von Krischer und Mitarbeitern /56,57,97/ verdeutlichen für Trocknungstemperaturen $< 100^{\circ}\text{C}$, daß auf Grund von Partialdruckdiffe-

renzen eine Dampfdiffusion in den kälteren Bereich des zu trocknenden Stoffes erfolgt, so daß dieser Bereich eine höhere Feuchtigkeit erhält. Durch den dadurch entstehenden Feuchtigkeitsgradienten wird in entgegengesetzter Richtung eine Kapillarwasserbewegung erzeugt. Untersuchungen von Kübler /59/ und Böhner / 5 / ergaben, daß diese Transportvorgänge richtungsabhängig sind. Kisseloff /46/ erklärt die Wasserbewegung in den kälteren Bereich mit einer Oberflächendiffusion, die nach seinen Untersuchungen für den Feuchtigkeitstransport und die Wärmeleitung maßgebend ist.

Die Untersuchungen über den Feuchtigkeitstransport im Holz bei Beheizung lassen die Frage offen, ob die entwickelten Vorstellungen auf Vorgänge mit hohen Aufheizgeschwindigkeiten übertragbar sind, da diese wesentlich höhere Drücke in den Poren erzeugen.

Obwohl die Kenntnisse über Bindungsmechanismen und Transportvorgänge der Feuchtigkeit im Holz bis heute nicht als endgültig gesichert angesehen werden können, zeigen sie doch auf, daß das thermische Verhalten von ihr beeinflußt wird.

Dieser Einfluß betrifft nicht nur die Wirkung der Verdampfung und Kondensation auf die örtliche Temperaturentwicklung und die Veränderung der Geometrie, sondern auch die Transport- und thermischen Stoffeigenschaften.

Stamm /87/ hat die Veränderung der Porosität analysiert und bis zur Fasersättigung ($u = 0.3$) eine Abnahme von 10 % ermittelt, wodurch zwangsläufig die Permeabilität verändert wird /28/ .

Die spezifische Wärmekapazität wurde für trockene Stoffe von Dunlap /21/ bei Temperaturen bis 106 °C untersucht und eine empirische Beziehung in Abhängigkeit von der Temperatur ermittelt, die von Kollmann /47/ unter Verwendung der Mischungsregel auf den Feuchtigkeitsgehalt erweitert wurde. Die Vermutung, daß ein Einfluß der Sorptionsenergie zu berücksichtigen sei, konnte von Kühlmann /60/ nicht bestätigt werden.

Wesentlich problematischer ist die Erfassung der Wärmeleitfähigkeit, da der Wärmetransport in feuchten Hölzern nicht nur von den Eigenschaften

der Zellwand und des eingeschlossenen Gases, sondern auch vom Feuchtigkeitstransport abhängig ist /10,11,38,57/. Experimentelle Untersuchungen mit Plattenapparaten von Griffith und Kaye /30/, Rowley /79/, Narayanamurty /70/ und Wangaard /99/ zeigen mit Zunahme der Feuchtigkeit einen deutlichen Anstieg der Wärmeleitfähigkeit.

Cammerer /9/, der diesen Effekt mit der Bildung von Transportbrücken erklärt, wies allerdings darauf hin, daß bei der Messung eine Feuchtigkeitsverlagerung auf die kalte Seite zu einer Verringerung der Meßwerte und somit zu Fehlern führt.

Die mathematische Formulierung der Abhängigkeiten der Wärmeleitfähigkeit von Dichte und Feuchtigkeit bei Raumtemperaturen wurde von MacLean /64/, Kollmann /49/ und Maku /65/ versucht. Kollmann und Malmquist /51/ studierten ebenfalls bei Raumtemperaturen über ein mathematisches Modell die Abhängigkeit von der Faserrichtung. Dieses Modell wurde von Kühlmann /60/ unter Verwendung der Transportgesetze nach Krischer /56/ auf den auftretenden Feuchtigkeitstransport und die Temperaturabhängigkeit erweitert.

Die bisher bekannten Untersuchungen zeigen, daß eine absolute Aussage über die Größe und das Verhalten der Wärmeleitfähigkeit nicht möglich ist, da die Anisotropie des Holzes ein einheitliches Verhalten nicht zuläßt und die Vorgänge im Körper noch nicht eindeutig geklärt sind.

2.2 Untersuchungen zur Pyrolyse von Holz

Neben den bereits beschriebenen Einflüssen, die sich aus Natur und Zustand des jeweiligen Stoffes ergeben, sind eine Reihe weiterer Parameter für den Gesamtprozeß bestimmend:

- a) Umgebungszustand
- b) Körpergeometrie
- c) Größe und Art des Wärmeübergangs

Die Untersuchungen wurden experimentell und theoretisch durchgeführt, wobei den beiden Betrachtungsweisen unterschiedliche Funktionen zukamen

2.2.1 Experimentelle Untersuchungen

Die experimentellen Untersuchungen dienen der punktuellen Erfassung natürlicher Vorgänge als Grundlage für ihre Beschreibung und Bewertung. Dazu wurden im vorliegenden Bereich unter verschiedenen Versuchsbedingungen Messungen der Temperatur, des Gewichtsverlustes, der Verkohlungstiefe und der auftretenden Wärmetönung durchgeführt, aus denen reaktionskinetische Parameter und Reaktionsenthalpien ermittelt wurden.

Untersuchungen mit der Differentialthermoanalyse (DTA) zeigen übereinstimmend nach anfänglichem endothermen Verlauf im Temperaturbereich über 250 °C ein weiteres exothermes Verhalten bei Holz, das mit dem größten Teil der Gewichtsabnahme zusammenfällt /24, 35, 73/. Havens /34/ dagegen ermittelte mit einer differentialkalorimetrischen Methode (DSC) bei Kiefer und Eiche endothermes Verhalten und schätzte aus seinen Diagrammen die jeweiligen Reaktionsenthalpien ab.

Weitere Werte für Zersetzungsenthalpien wurden aus mathematisch - physikalischen Analysen von Temperaturmessungen ermittelt, deren Ergebnisse stark streuen, wie aus Tabelle 2.4 ersichtlich ist. Der Grund für die Uneinheitlichkeit der Ergebnisse liegt in der Verschiedenartigkeit der Versuchsbedingungen und den Annahmen für die Rechenmodelle.

Bamford u.a. /1/, Roberts und Clough /77/ und Tinney /92/ berücksichtigten die Änderung der Stoffwerte bei fortschreitender Zersetzung und innerer Konvektion nicht. So ist es zu erklären, daß Kung und Kalelkar /62/ aus der Anpassung eines differenzierteren Modells an die Werte von Experiment 3 aus /77/ eine endotherme Zersetzungsenthalpie errechneten, während das Ergebnis von Roberts und Clough exothermes Verhalten beschreibt.

Darüberhinaus zeigte Havens /34/ Abhängigkeiten von der Holzart auf und Lee u.a./63/ untersuchten den Einfluß des an das Holz übertragenen

Wärmestroms und der Faserrichtung.

Bei Berücksichtigung aller Ergebnisse zeigt es sich, daß umfangreichere Untersuchungen zur Klärung der Abhängigkeiten erforderlich sind.

Das gilt auch für die bisher veröffentlichten reaktionskinetischen Daten, die überwiegend aus Gewichtsabnahmeuntersuchungen ermittelt wurden.

In allen Untersuchungen wurde die Temperaturabhängigkeit des Zersetzungs-
vorganges durch die Verwendung der Gleichung von Arrhenius /76/

$$k = k_0 \cdot e^{-\frac{E}{R \cdot T}} \quad (2.-1)$$

berücksichtigt, mit deren Hilfe die Gesetzmäßigkeit für den Reaktions-
mechanismus der thermischen Zersetzung

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} = -k (\rho - \rho_c)^n \quad (2.-2)$$

beschrieben wird.

Die Zusammenstellung von reaktionskinetischen Daten aus der Literatur in Tabelle 2.5 zeigt, daß dabei überwiegend eine Reaktion 1. Ordnung ($n = 1$) zugrundegelegt wurde. Eine Ausnahme macht Brown /7/, dessen Fortführung der Arbeiten von Havens /34/ an Kiefer und Eiche auch in diesem Bereich deutlich Abhängigkeiten von der Holzart und dem Grad der Zersetzung nicht nur in Hinsicht auf Aktivierungsenergie und Häufigkeitsfaktor, sondern auch bezüglich der Reaktionsordnung aufweist.

Stamm /88/ hingegen fand eine ausgezeichnete Übereinstimmung mit der Reaktion 1. Ordnung bei einer Analyse der Ergebnisse aus Gewichtsabnahmeuntersuchungen verschiedener beheizter organischer Stoffe, wobei unter anderem Nadelhölzer untersucht wurden.

Autor	Atmosphäre	Beheizung	Holzart Probenform/-größen	Temperatur	Bestimmung	Bedingung	q_z
			mm	$^{\circ}\text{C}$			kJ / kg
Bamford u.a. /1/	Luft	beidseitig beflammt	Nadelholz Platten d=20 d=40	< 477	Rechenmodell	gesamter Temperaturbereich	360
Roberts/ Clough /77/	N_2	Ofen $\frac{\Delta \vartheta}{\Delta \tau} = 20 \frac{\text{K}}{\text{min}}$	Buche Zylinder d=20	< 288	Rechenmodell	ortsabhängig Zentrum: Rand :	314 1172
				> 350		unabhängig vom Ort	293 ± 335
Tinney /92/	Luft	Ofen $\vartheta_{\text{Ofen}} = \text{const.}$	Tanne Zylinder d = 6.4 , 9.5 , 12.7	300 ± 650	Rechenmodell	$0 < \Delta G/G_{\alpha} < 0.5 \dots 0.67$ $0.5 \dots 0.67 < \Delta G/G_{\alpha}$	84 ± 126 837 ± 2300
Havens /34/	N_2	Differential- kalorimeter $\frac{\Delta \vartheta}{\Delta \tau} = 20 \frac{\text{K}}{\text{min}}$	Kiefer/Eiche Sägemehl 10 mg	< 500	Thermogramm	Kiefer	- 199
						Eiche	- 111
Kung/ Kalelkar/62/	Experiment 3 aus Roberts/Clough /77/				Rechenmodell		- 203
Lee u.a. /63/	N_2	CO_2 - Laser (Beheizung in Zylinder- achsenrich- tung)	Ahorn Zylinder d = 20 e = 80		Rechenmodell	Obertragener Wärmestrom: 31.8 kJ/m ² s (parallel zur Faser)	- 528 ± - 611
						83.7 kJ/m ² s (parallel zur Faser)	105 ± 394
						83.7 kJ/m ² s (senkrecht zur Faser)	1089 ± 1717

Tabelle 2.4: Zusammenstellung aus der Literatur bekannter Reaktionsenthalpien
<https://doi.org/10.24355/dbbs.084-201904081146-0>

Autor	Atmosphäre	Beheizung	Holzart Probenform/-größen	Temperatur	Bestimmung	Bedingung	E	K_o	n
			mm	$^{\circ}\text{C}$			J/mol	s^{-1}	
Bamford u.a./1/	Siehe Tabellen 2.4				Rechenmodell	gesamter Temperaturbereich	138834	5.3×10^8	1.0
Stamm /88/	Luft	Ofen	Nadelholz Leisten d=25.4	93.5 - 250	Gewichtsver- lust	Beheizung	123510	6.23×10^7	1.0
		Metall - schmelzen	Furnier d=1.6	167 - 300			124767	2.8×10^7	1.0
Roberts/ Clough/77/	Siehe Tabelle 2.4				Rechenmodell Gewichts- verlust	$< 288^{\circ}\text{C}$	104670	4.3×10^7	1.0
						$\Delta G/G_{\alpha} < 0.21$			
						$> 350^{\circ}\text{C}$ $\Delta G/G_{\alpha} < 0.475$	62802	1517	1.0
Tinney/92/	Siehe Tabelle 2.4				Rechenmodell Gewichts- verlust	$0 < \Delta G/G_{\alpha} < 0.5..$ 0.67	124575	$6 \cdot 10^7 \pm$ 7.5×10^8	1.0
						$0.5...0.67 < \Delta G/G_{\alpha}$	$152165 \pm$ 178773	$4 \times 10^8 \pm$ 2×10^9	1.0
Brown /7/	N_2	Differential- kalorimeter	Kiefer, Eiche Sägemehl 10 mg	< 500	Gewichtsverlust	Kiefer: $0 < \Delta G/G_{\alpha} < 0.5$	206828	10^{13}	1.7
						$0.5 < \Delta G/G_{\alpha} < 0.9$		7.94×10^{15}	1.0
						Eiche: $0 < \Delta G/G_{\alpha} < 0.6$	238648	2.69×10^{16}	1.7
						$0.6 < \Delta G/G_{\alpha} < 1$		5.14×10^{18}	2.1

Tabelle 2.5: Zusammenstellung aus der Literatur bekannter reaktionskinetischer Daten

Die weiteren aufgeführten Untersuchungen / 1,77,92/ wurden mit den bereits erwähnten Rechenmodellen durchgeführt, wobei mit Ausnahme der Arbeit von Bamford u.a. Vergleiche mit gemessenen Gewichtsverlusten vorgenommen wurden.

Roberts /76/ analysierte die Ergebnisse verschiedener Autoren und stellte eine grundsätzliche Abhängigkeit der Reaktionskinetik von der Probengröße fest, da bei größeren Körpern (> 10 mm) wegen vorhandener Temperatur- und Druckgradienten autokatalytische Prozesse wirksam werden, die in Faserrichtung verstärkt auftreten.

2.2.2 Mathematisch - physikalische Untersuchungen

Mathematische Modelle geben die Möglichkeit, breit angelegte systematische Untersuchungen durchzuführen, die besonders zum Studium des Einflusses verschiedener Parameter gut geeignet sein können. Dazu müssen jedoch ausreichende Kenntnisse über das Verhalten und die Stoffwerte realer Systeme aus experimentellen Arbeiten vorliegen, damit signifikante Einflüsse berücksichtigt und Vergleiche mit Meßwerten sinnvoll werden.

Außer einigen mit der thermischen Behandlung von Holz im unteren Temperaturbereich (< 100 °C) befaßten Arbeiten, die sich vor allem auf den Einfluß der Feuchtigkeit und der Stoffwerte beziehen /15,65/; liegen überwiegend Untersuchungen zum thermischen Verhalten bei höheren Temperaturen unter Berücksichtigung der thermischen Zersetzung vor.

Die Unterschiede zwischen den einzelnen Arbeiten liegen im Bereich

- des Wärmeübergangs
- des Stoffwertverhaltens
- der Reaktionskinetik
- der Wärmetönung
- der Transportprozesse im Körper
- der Lösungsmethoden

Die Modelle von Bamford u.a. /1/ und Tinney /92/ sind einfache Berechnungen der Fourierschen Wärmeleitungsgleichung unter Berücksichtigung der thermischen Zersetzung nach dem Gesetz von Arrhenius bei unveränderlichen Stoffwerten. Sie wurden zur Berechnung der Reaktionskinetik und der Zersetzungsenthalpie in Vergleichsuntersuchungen verwendet, wobei als Lösungsmethode das Crank-Nicolson-Verfahren /13/ Anwendung fand.

Weatherford und Sheppard /100/ verwendeten das gleiche Gleichungssystem mit dem Datensatz aus /1/ zur Ermittlung von Zündgesetzmäßigkeiten und lösten es mit dem Verfahren von Schmidt /82/.

Stoffwertänderungen wurden erstmals von Panton und Rittmann /72/ berücksichtigt, wobei die Änderung der Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit von der Dichte eingebaut wurde. Die Lösung wurde mit einer speziellen Methode von Rittmann /75/ durchgeführt.

Da Blackshear und Kanury /4/ bei einer Analyse thermischer Untersuchungen von Holz feststellten, daß die innere Konvektion, die sich auf Grund von Temperatur- und Druckgradienten einstellt, bei der Untersuchung des thermischen Verhaltens von Holz nicht vernachlässigt werden darf, entwickelten Kung /61/ und Kansa u.a. /42/ mathematische Modelle unter Berücksichtigung dieses Effektes. Beide verwendeten feste Stoffwerte für Holz und Holzkohle und ermittelten für Bereiche im teilpyrolysierten Zustand Werte in Abhängigkeit vom Zersetzungsgrad. Unterschiede liegen vor allem in der Art der Berücksichtigung der inneren Konvektion und der Lösungsmethode. Während Kung ohne Strömungswiderstände nach Crank-Nicolson rechnet, berücksichtigen Kansa u.a. über das Gesetz von Darcy /69/ den Einfluß der Widerstände durch die Lage der Faser und Größe der Poren und lösten ihr System nach Keller /44/.

Die bisher beschriebenen Modelle verwenden zur Berechnung des Zersetzungsverlaufs das Gesetz von Arrhenius.

Kanury /40/ hingegen erstellte ein einfaches Gleichungssystem für die Annahme linearer Temperaturverläufe, wobei die thermische Zersetzung als ein Vorgang mit höherer Aktivierungsenergie angesehen wurde, der bei Erreichen einer kritischen Temperatur plötzlich beginnt.

Eine andere Möglichkeit wurde von Havens u.a. /33/ aufgezeigt. Hier wurde ein mathematisches Modell entwickelt, das nach einer von Hashemi /32/ vorgestellten Methode gelöst wurde. Dabei wurden die von Havens /34/ gemessenen "Energie-Kapazitäten", die die Änderung der spezifischen Wärmekapazität und den Einfluß der Zersetzungsenthalpie kollektiv beschreiben, und die von Brown /7/ ermittelten Wärmeleitfähigkeiten von Kiefernholz und -holzkohle verwendet. Diese Beschreibung weicht wegen der Eingabe der vollständigen Verläufe gemessener Größen von den anderen bislang bekannten Untersuchungen ab.

Alle bekannten Modelle, die Vorgänge bei Temperaturen im Bereich thermischer Zersetzung beschreiben, gehen von trockenen Stoffen aus, so daß Aussagen über den Feuchtigkeitseinfluß auf den Aufheizprozeß in diesen Temperaturbereichen noch nicht vorliegen.

3. Das mathematisch - physikalische Modell

3.1 Allgemeine Beschreibung

Wie bereits im Kapitel 2. ausgeführt wurde, ist für eine systematische Untersuchung physikalischer Vorgänge in einem System eine mathematische Formulierung der darin ablaufenden Prozesse und Zusammenhänge unerlässlich, da auf dieser Grundlage Art und Einfluß einzelner Parameter untersucht werden können. Dabei können die jeweiligen Daten so verändert werden, daß extreme Verhältnisse beschrieben werden können, mit deren Hilfe die Verhaltensweise eines Systems bezüglich einzelner Parameter abgeschätzt werden kann.

Einschränkend muß jedoch darauf hingewiesen werden, daß solche Modelle aus Gründen der Vorkenntnisse der physikalischen Vorgänge und der mathematischen Formulierung zwangsläufig Vereinfachungen aufweisen müssen, deren Einfluß nicht immer eindeutig zu klären ist. Hier liegen Unsicherheiten bezüglich einer absoluten Aussage durch Modellrechnungen, die jedoch den Wert solcher Untersuchungen nicht mindern, da wegen der Komplexität der physikalischen Zusammenhänge eines Systems

häufig Tendenzen in der richtigen Größenordnung als Ergebnis ausreichend sind.

Im vorliegenden Fall wird ein Modell für das Aufheiz- und Zersetzungsgeschehen in Holz unter Berücksichtigung des Einflusses der sorptiv gebundenen Feuchtigkeit, die nach Kollmann im Bereich zwischen $u_p = 0$ und 15 Gew.-% liegt /49/, erstellt. Dieser Bereich entspricht der Feuchtigkeit trockener bis geschützt gelagerter, lufttrockener Hölzer /54,95/.

Dazu ist es erforderlich, die auftretenden Vorgänge zu erläutern und daraus die erforderlichen Vereinfachungen abzuleiten.

Ausgangspunkt der Überlegung ist dabei ein quadratischer, plattenförmiger Holzkörper, der in einem quaderförmigen Ofenraum mit gleichmäßig erwärmten Wänden aufgeheizt wird, wobei die Wärmeübertragung durch Strahlung und freie Konvektion erfolgt.

Der Körper selbst ist dabei so beschaffen, daß die Wärme nur auf einer Seite in ihn eindringen und ein Wärme- und Stoffübergang auf der gegenüberliegenden Seite nicht erfolgen kann, da das System dort abgeschlossen ist (Abb. 3.1).

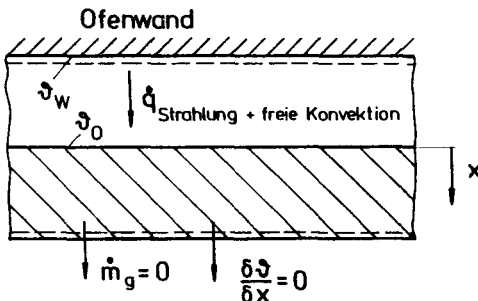


Abb. 3.1 :
Aufbau des Systems in
der Umgebung des
Holzkörpers

Dabei sollen die Betrachtungen eindimensional sein, da eine mehrdimensionale Betrachtungsweise den Einfluß der zu untersuchenden Parameter nicht besser wiedergeben, aber den mathematischen Aufwand erheblich erhöhen würde.

Die Vorgänge innerhalb des Körpers hängen von den stofflichen Eigenschaften und der Temperaturverteilung ab. Außerdem beeinflußt die Feuchtigkeit bei hygroskopischen Stoffen je nach Größe und Einbindung die Teilprozesse.

Unter der Voraussetzung reiner Aufheizung und thermischer Zersetzung, d.h. ohne Zündung und Abbrand, gibt Abb. 3.2 die sich zeitlich nacheinander ausbildenden Bereiche innerhalb des Körpers schematisch wieder.

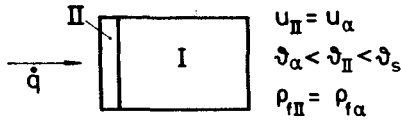
Dabei soll bei Beginn der Aufheizung ein Körper gleichmäßiger Anfangstemperatur und gleichen Feuchtigkeitsgehaltes vorliegen (Abb. 3.2 a), dessen Randzone erwärmt wird, wobei Auswirkungen auf die Feuchtigkeit und die Substanz noch nicht zu beobachten sind (Abb. 3.2b). Bei Erreichen der Siedetemperatur an der Oberfläche bildet sich eine Trocknungszone (III) aus, in der die Feuchtigkeit bei andauernder Wärmezufuhr abnimmt (Abb. 3.2c) bis nach Beendigung der Trocknung eine weitere Erwärmung des trockenen Bereiches erfolgt, wobei mit der Temperatur das Zersetzungsgeschehen beschleunigt, d.h. die Zellsubstanz spürbar abgebaut wird. Dieser Vorgang erfolgt zwar schon in geringem Maße bei Temperaturen unterhalb der Siedetemperatur /25/, erfordert dann aber so große Prozeßzeiten, daß er für einen Aufheizprozeß unter den vorgegebenen Bedingungen vernachlässigbar klein wird. Die Zersetzung ist beendet, wenn die Dichte der Zellwand die Dichte von Holzkohle erreicht hat.

Die Verkohlungszone (V) gilt innerhalb des hier betrachteten Modells als Endphase in der stofflichen Veränderung, d.h. daß in dieser Zone nur noch Aufheizung erfolgt.

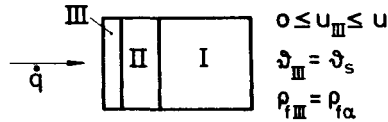
In diesem Zusammenhang ist zu bemerken, daß die dargestellte Vielfalt unterschiedlicher Zonen von der Dicke der Platte und der Ofentemperatur sowie der Expositionszeit abhängig ist. Bei dünnen Platten werden ins-



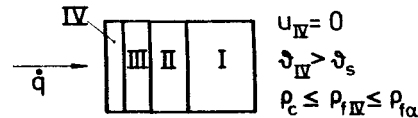
a) $\tau = 0$: Unbeeinflusster feuchter Bereich (I)



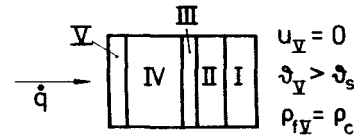
b) $\tau = \tau_1$: Bildung einer feuchten Aufwärmzone (II)



c) $\tau = \tau_2$: Bildung einer Trocknungszone (III)



d) $\tau = \tau_3$: Bildung einer trockenen Aufwärmzone mit zunehmender Zersetzung (IV)



e) $\tau = \tau_4$: Bildung einer Kohlezone (V)

Abb. 3.2: Entwicklung von Bereichen unterschiedlicher Eigenschaften bei der Aufheizung von Holz

gesamt weniger Zonen gleichzeitig auftreten als hier dargestellt wurde.

3.2 Die mathematisch - physikalische Beschreibung

Die Bildung der einzelnen Zonen erfolgt auf Grund mehrerer sich überlagernder Transportvorgänge, verbunden mit Zustandsänderungen des eingebundenen Wassers (Trocknung) und der Zellsubstanz (Zersetzung). Aus der mathematisch - physikalischen Beschreibung der verschiedenen Einzelprozesse ergibt sich das gewünschte mathematische Modell, das im einzelnen folgende Vorgänge umfaßt:

- 1) Wärmeübergang durch Strahlung und freie Konvektion
- 2) Energietransport im Körper durch Leitung und Konvektion
- 3) Massentransport im Körper durch Strömungsvorgänge
- 4) Energiequellen durch Kondensation ($\phi_{q, \text{Kond.}}$) und Zersetzung ($\phi_{g, Z}$)
- 5) Energiesenke durch Entfeuchtung ($\phi_{q, T}$)
- 6) Stoffquellen durch Entfeuchtung ($\phi_{g, T}$) und Zersetzung ($\phi_{g, Z}$)
- 7) Stoffsenke durch Kondensation ($\phi_{g, \text{Kond.}}$)
- 8) Änderung der Stoffwerte mit Temperatur, Feuchtigkeit und Zersetzungsgrad

Abb. 3.3 gibt schematisch die im Gesamtsystem auftretenden einzelnen Prozesse wieder.

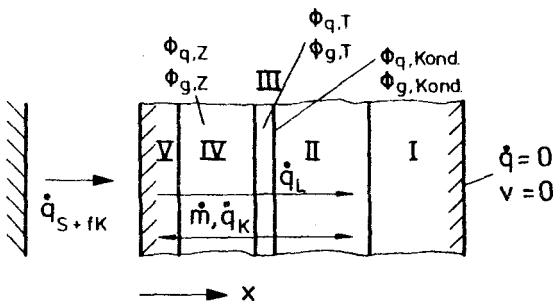


Abb. 3.3 :
Schematische Darstellung der im untersuchten System ablaufenden Vorgänge

3.2.1 Der Wärmeübergang

Der Beschreibung des Wärmeübergangs zwischen Ofenwand und Holzkörper liegt die Vorstellung zweier paralleler Wände zugrunde, aus der sich die Übergangsbedingungen ableiten. Die Strömungsverhältnisse ergeben sich aus den thermischen Verhältnissen zwischen den Wänden und der Voraussetzung, daß eine erzwungene Strömung nicht vorliegt. So wird neben dem Wärmeübergang durch Strahlung freie Konvektion unter laminaren Bedingungen angenommen.

Der Wärmeübergang läßt sich allgemein nach dem Newtonschen Gesetz

$$\dot{q} = \alpha_{\text{ges}} (\vartheta_U - \vartheta_0) \quad (3.2-1)$$

berechnen, wobei sich in diesem Fall der Wärmeübergangskoeffizient α_{ges} aus einem Anteil für freie Konvektion α_{fK} und einem Anteil für Strahlung α_S zusammensetzt :

$$\alpha_{\text{ges}} = \alpha_S + \alpha_{\text{fK}} \quad (3.2-2)$$

Dabei wird der Wärmeübergangskoeffizient α_S aus dem Stefan - Boltzmannschen Gesetz ermittelt :

$$\alpha_S = \frac{C_S \cdot \epsilon_{12} \cdot \varphi \left[\left(\frac{T_U}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right]}{T_U - T_0} \quad (3.2-3)$$

Wegen der Voraussetzung paralleler Flächen ergeben sich folgende Bedingungen für das Emissionsverhältnis ϵ_{12} und das Winkelverhältnis φ nach Eckert /23/

$$\epsilon_{12} = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1} \quad (3.2-4)$$

$$\varphi = 1 \quad (3.2-5)$$

Dabei wird das Emissionsverhältnis für die Ofenwand mit

$$\varepsilon_1 = 0,93 \quad (3.2-6)$$

eingesetzt /96/ und für das Holz nach den Ergebnissen von Kollmann und Malmquist /50/ berechnet. Die verwendete Beziehung

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_H = 1,3 u + 0,65 \quad (3.2-7)$$

ist eine Näherung des angegebenen Verlaufs für Fichte und Birke im Bereich hygroskopisch gebundener Feuchtigkeit (bis $u = 0,25$), wobei der geringe Temperatureinfluß vernachlässigt wird.

Da für Holzkohle keine Daten verfügbar sind, wird der Wert für glühende Kohle nach Gumz /31/

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_C = 0,8 \quad (3.2-8)$$

im Falle verkohlter Oberfläche berücksichtigt.

Der Wärmeübergang bei freier Konvektion läßt sich nach /96/ berechnen. Dabei ergibt sich α_{fK} aus der Nu - Zahl zu

$$\alpha_{fK} = \frac{Nu \cdot \lambda_R}{l} \quad (3.2-9)$$

Die Nu - Zahl wird bei freier Konvektion aus der Grashof - Zahl

$$Gr = \frac{\varphi^2 \beta \cdot (\vartheta_u - \vartheta_o) \cdot l_K^3}{\eta^2 \cdot g} \quad (3.2-10)$$

ermittelt:

$$Nu = C \cdot Gr^{1/4} \quad (3.2-11)$$

Der Faktor C ist von den Stoffwerten der Atmosphäre, also der Pr - Zahl

$$Pr = \frac{\eta_R \cdot c_R}{\lambda_R} \quad (3.2-12)$$

der Atmosphäre abhängig, wobei folgende Bedingungen einzuhalten sind:

$$C = 1,8 \frac{Pr^{1/2}}{2,3 + Pr^{1/2}} \quad \text{für } Pr < 0,5 \quad (3.2-13)$$

$$C = 0,652 \left(\frac{Pr^2}{1,1 + Pr^{1/2}} \right)^{1/4} \quad \text{für } Pr > 0,5 \quad (3.2-14)$$

Diese Berechnungsvorschriften gelten jedoch nur für laminare Strömung, d.h. für die Bedingung

$$Gr \cdot Pr < 10^8 \div 10^9 \quad (3.2-15)$$

da sonst der Umschlag in den turbulenten Bereich berücksichtigt werden muß. Bei den nachfolgend beschriebenen Vorgängen wird diese Voraussetzung jedoch stets eingehalten.

Da die Ergebnisse des mathematischen Modells mit den experimentellen aus Kap. 4 verglichen werden sollen, gehen für die Ermittlung der Stoffwerte der Atmosphäre zwischen den Wänden Werte für Stickstoff /71/ in die Berechnung ein.

3.2.2 Die instationäre Massenbilanz für das Gas

Die Aufheizung eines porösen Körpers bewirkt wegen des sich ausbildenden Temperaturgradienten und des dadurch entstehenden Druckpotentials einen Gastransport jeweils in Richtung des kleineren Druckes. Dieser kann sowohl im Bereich der Randzonen liegen, da dort der Einfluß des Außendruckes spürbar wird, als auch im kälteren Bereich, wo die Molekularbewegung des Gases geringer ist.

Weiterhin können Stoffquellen und -senken, wie sie beim vorliegenden Problem durch Trocknung, Kondensation und Pyrolyse auftreten können, zu Druckänderungen im System führen.

Aus diesen Überlegungen läßt sich die instationäre Massenbilanz für das Gas im vorgegebenen offenen System allgemein ableiten (Abb. 3.4), wobei eindimensionaler Transport durch ein ausgewähltes Kontrollvolumen (KV) betrachtet wird:

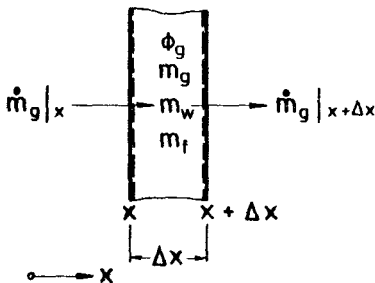


Abb. 3.4 :

Schematische Darstellung des Kontrollvolumens für die Ableitung der instationären Massenbilanz.

$$\{ \text{Zeitliche Änderung der Gasmasse im KV} \} + \{ \text{Aus dem KV austretender Gasstrom} \} - \{ \text{In das KV eintretender Gasstrom} \}$$

$$- \{ \text{Quellzustrom durch Zustandsänderungen} \} = 0$$

(3.2-16)

Aus dieser allgemeinen Aussage ergibt sich unmittelbar die mathematische Formulierung.

Wird die Beziehung für die Gasmasse im Hohlraum

$$m_g = \rho_g \cdot V_g \quad (3.2-17)$$

mit der Definition für die Porosität

$$\epsilon_g = \frac{V_g}{V} \quad (3.2-18)$$

ausgedrückt

$$m_g = \epsilon_g \cdot \rho_g \cdot V \quad (3.2-19)$$

und der Massenstrom

$$m_g = \rho_g \cdot v \cdot A \quad (3.2-20)$$

mit der auf die Gesamtfläche A des KV bezogenen Geschwindigkeit v definiert, so läßt sich die Massenbilanz für das Gas im KV unter Berücksichtigung des Quellterms ϕ_g V folgendermaßen beschreiben:

$$\frac{(\epsilon_g \cdot \rho_g |_{\tau+\Delta\tau} - \epsilon_g \cdot \rho_g |_{\tau}) V}{\Delta\tau} - (\rho_g \cdot v |_{x+\Delta x} - \rho_g \cdot v |_x) A - \phi_g \cdot V = 0 \quad (3.2-21)$$

Mit

$$V = A \cdot \Delta x \quad (3.2-22)$$

und dem Grenzübergang $\Delta\tau \rightarrow 0$ und $\Delta x \rightarrow 0$ ergibt sich daraus die Differentialgleichung für die instationäre Massenbilanz des Gases:

$$\frac{\partial (\varepsilon_g \cdot \rho_g)}{\partial \tau} + \frac{\partial (\rho_g \cdot v)}{\partial x} - \phi_g = 0 \quad (3.2-23)$$

3.2.3 Gesetz von Darcy

Eine wesentliche Größe zur Bestimmung der in Kap. 3.2.2 hergeleiteten Bilanz ist die auf die Gesamtfläche des Kontrollvolumens bezogene Geschwindigkeit v des Gasstromes. Sie ist vom Druckgradienten, den Gaseigenschaften und der Porenstruktur des Körpers abhängig.

Letztere ist besonders bei organischen Stoffen wie Holz so angeordnet, daß auf experimentelle Untersuchungsergebnisse zurückgegriffen werden muß.

Muskat /69/ hat eine allgemeine Beschreibung der Vorgänge über eine Ähnlichkeitsbetrachtung erstellt, aus der sich die Geschwindigkeit v ermitteln läßt:

$$-\frac{\Delta p}{\Delta x} = \text{const.} \cdot \frac{\eta^2}{\rho \cdot d^3} F \left(\frac{d \cdot v \cdot \rho}{\eta} \right) \quad (3.2-24)$$

Daraus folgt mit

$$\frac{\text{const.}}{d^2} = C_1 \quad (3.2-25)$$

und

$$-\frac{\Delta p}{\Delta x} = \text{const.} \cdot \frac{\eta \cdot v}{d^2} \quad \text{für kleine } v, d, \rho \quad (3.2-26)$$

sowie mit

$$\frac{\text{const.}}{d} = C_2 \quad (3.2-27)$$

und

$$-\frac{\Delta p}{\Delta x} = \text{const.} \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{d} \quad \text{für große } v, d, \rho \quad (3.2-28)$$

nach Forchheimer /26/ für die vollständige Beschreibung des Druckgradienten

$$-\frac{dp}{dx} = C_1 \cdot \eta \cdot v + C_2 \cdot \rho \cdot v^2 \quad (3.2-29)$$

wobei der erste Teil den Viskositätseinfluß und der zweite den Trägheitseinfluß wiedergibt./29/

Curry und Cox /14/ haben für eine charakteristische Reynolds - Zahl

$$Re_1 = \frac{C_2 \cdot V \cdot \rho}{C_1 \cdot \eta} \leq 0,1 \quad (3.2-30)$$

ermittelt, daß ein Einfluß der Trägheitskräfte auf den Strömungsverlauf vernachlässigbar ist (Abb. 3.5). Da diese Bedingung in der vorliegenden Untersuchung eingehalten wird, ergibt sich mit dem Grenzübergang $\Delta x \rightarrow 0$ für die weitere Berechnung

$$-\frac{dp}{dx} = C_1 \cdot \eta \cdot v \quad (3.2-31)$$

woraus mit

$$C_1 = 1 / \kappa \quad (3.2-32)$$

das Gesetz von Darcy / 3 / folgt:

$$\frac{dp}{dx} + \frac{\eta}{\kappa} v = 0 \quad (3.2-33)$$

In dieser Beziehung ist die Gasdurchlässigkeit oder Permeabilität κ ¹⁾ enthalten, die für jeden Stoff experimentell bestimmt werden muß.

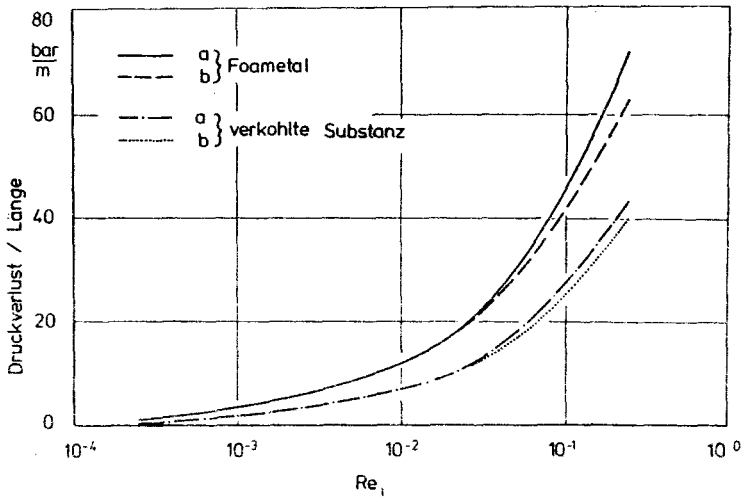


Abb. 3.5 : Abhängigkeit des Druckverlustes von der charakteristischen Reynolds - Zahl Re_1 / 14/ (a) Zähigkeitseinfluß, b) Zähigkeits- und Trägheitseinfluß)

1) s. Fußnote auf S. 9

3.2.4 Die instationäre Energiebilanz

Die Beheizung eines porösen Körpers bewirkt sowohl eine Erwärmung der festen Zellwand, als auch des eingeschlossenen Gases und eventuell vorhandener fester und flüssiger Einlagerungen.

Betrachtet man das System als eine Mischung aus unbeweglichen Wänden und Gas, das auf Grund von Druckpotentialen an ihm vorbeiströmen kann, so ergibt sich durch Ausdehnung bei Erwärmung ein Gasstrom, der durch Dampf und Zersetzungsprodukte angereichert werden kann. Dieser strömt zum einen in den kälteren Bereich, wodurch Wärme vom Fluid an die Wand übergeht und zum anderen an die wärmere, beheizte Oberfläche, wobei die Wand Wärme an das Gas abgeben wird. In beiden Fällen findet ein innerer Wärmeübergang statt. Dabei stellt sich die Frage, ob das System Gas - Wand innerhalb eines ausgewählten Kontrollvolumens als annähernd im thermischen Gleichgewicht stehend angesehen werden kann, d.h.

$$\vartheta_f = \vartheta_g \quad (3.2-34)$$

ist, oder aber wegen Nichteinhaltung dieser Bedingungen der Wärmeübergang entscheidend für das Verhalten des Gesamtsystems ist. In diesem Fall müßten für Gas und Wand jeweils eigene Energiebilanzen erstellt werden, die über einen inneren Wärmeübergangskoeffizienten α_{innen} miteinander gekoppelt werden können.

Dazu liegen einige Untersuchungen vor, aus denen keine quantitativen Aussagen ableitbar sind, da Holz kein Untersuchungsgegenstand war. Allerdings können tendenzmäßige Aussagen gemacht werden, die die Entscheidung hierfür erleichtern.

So haben Koh und Del Casal /45/ aus analytischen Berechnungen einen Term

$$A_K = \frac{\alpha_{v, \text{innen}} \cdot l \cdot A}{\dot{m}_g \cdot c_{pg}} \quad (3.2-35)$$

ermittelt, der den konvektiven Einfluß eines durch einen porösen Körper strömenden Fluids auf die Temperaturdifferenz zwischen Fluid und Wand

$$\Delta \vartheta_{\text{innen}} = \vartheta_f - \vartheta_g \quad (3.2-36)$$

beschreibt. Diese wird vernachlässigbar, wenn A_K groß wird.

Daraus ergibt sich eine Näherung zum thermischen Gleichgewicht, wenn der volumenbezogene Wärmeübergangskoeffizient $\alpha_{v,\text{innen}}$ bzw. die durchströmte Strecke l groß oder aber die Massenstromdichte bzw. die spez. Wärmekapazität des Fluids klein sind.

Aus dieser Aussage kann gefolgert werden, daß zu Beginn einer Beheizung die Abweichung vom thermischen Gleichgewicht am größten sein wird, da die durchströmte Strecke am kleinsten ist. Diese Aussage wird durch Untersuchungen von Curry und Cox /14/ erhärtet. Abb. 3.6 zeigt einen Vergleich von Berechnungen der Temperaturen innerhalb eines porösen Systems mit und ohne Berücksichtigung des Wärmeübergangs. Die Stoffwerte der zugrundegelegten verkohlten Substanz ähneln denen der hier vorgelegten Untersuchungen.

Der Massenstrom durch den betrachteten Körper war jedoch konstant und gegenläufig zum Wärmestrom und nicht wie bei Beheizung von Holz abhängig von den Vorgängen im Körper. So müssen diese Ergebnisse als Extreme angesehen werden. Trotzdem läßt sich daraus ablesen, daß zu Beginn des Aufheizvorganges deutliche Unterschiede zwischen den Gas- und Feststofftemperaturen bestehen. Später findet eine Angleichung statt, die mit dem thermischen Gleichgewicht recht gut übereinstimmt.

Dieser Umstand dürfte auf eine andere Verteilung der gespeicherten Wärme zurückzuführen sein, die wiederum vom Wärmeübergang abhängt.

Die Ergebnisse aus den bisher vorliegenden Berechnungsvorschriften für den Wärmeübergangskoeffizienten $\alpha_{v,\text{innen}}$ streuen unter der Voraussetzung gleicher thermophysikalischer Bedingungen stark /14/, so daß es nicht sicher ist, daß bei Berücksichtigung des inneren Wärmeüber-

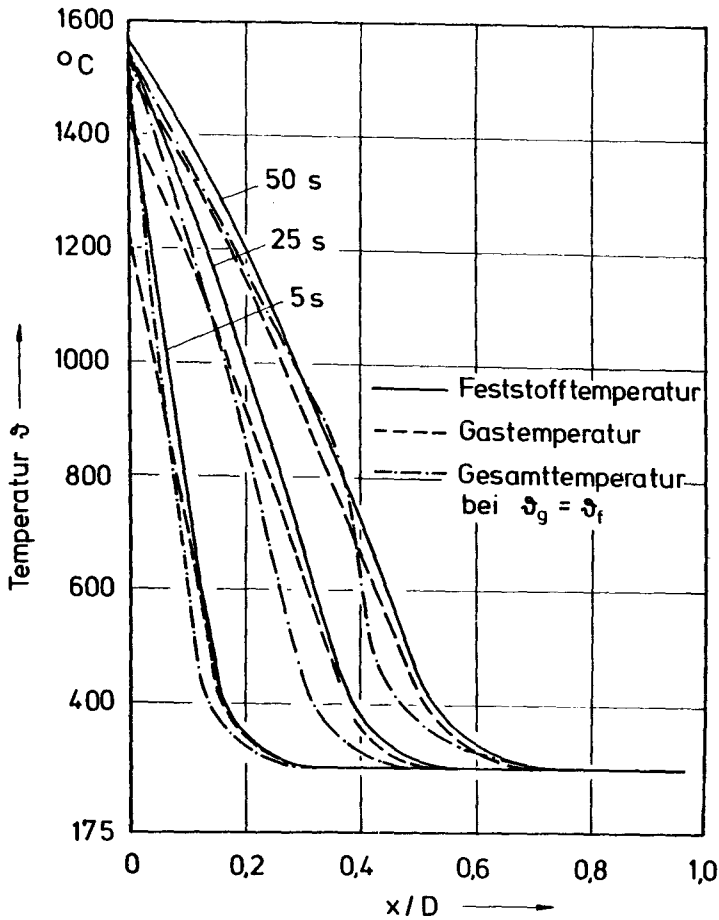


Abb. 3.6 : Vergleich von Aufheizberechnungen unter Berücksichtigung thermischen Gleichgewichtes und getrennter Bilanzen für Wand und Gas /14/

gangs die Berechnung zu besseren Ergebnissen führt, zumal der Massenstrom in einem beheizten Holzkörper abgesehen von der Randzone sehr klein ist.

Die Erkenntnisse aus bisherigen Arbeiten lassen den Schluß zu, daß die Annahmen thermischen Gleichgewichtes und somit die Anwendung einer Energiebilanz für das Gesamtsystem für eine theoretische phänomenologische Untersuchung der thermischen Vorgänge in Holz ausreichend sind.

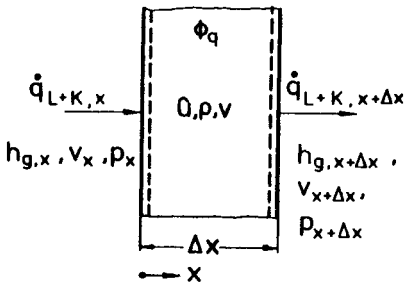


Abb. 3.7 :
Schematische Darstellung
des Kontrollvolumens zur
Erstellung der instationären
Energiebilanz.

So lautet die instationäre Energiebilanz für das ausgewählte Kontrollvolumen in dem beschriebenen offenen System allgemein / 3 /

$$\begin{aligned}
 & \left\{ \begin{array}{l} \text{zeitliche Änderung} \\ \text{der inneren u. kinetischen} \\ \text{Energie im KV} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{In das KV eintretende innere u.} \\ \text{kinetische Energie durch Konvektion} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{Aus dem KV austretende innere} \\ \text{u. kinetische Energie durch} \\ \text{Konvektion} \end{array} \right\} \\
 & - \left\{ \begin{array}{l} \text{In das KV eintretender Wärmestrom} \\ \text{durch Leitung} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{aus dem KV austretender Wärmestrom} \\ \text{durch Leitung} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{Nettoleistung des KV an d.} \\ \text{Systemgrenze} \end{array} \right\} \\
 & - \left\{ \begin{array}{l} \text{Quellzustrom durch Zustandsänderungen} \\ \text{im KV} \end{array} \right\} = 0 \qquad (3.2-37)
 \end{aligned}$$

Mathematisch läßt sich die Gleichung folgendermaßen entwickeln:

$$\frac{\rho \left(\hat{u} + \frac{\rho_g v^2}{2} \right) |_{\tau + \Delta \tau} - \rho \left(\hat{u} + \frac{\rho_g v^2}{2} \right) |_{\tau}}{\Delta \tau} V + \left(\left(\hat{u}_g + \frac{1}{2} v^2 \right) \rho_g \cdot v \right) |_{x + \Delta x} - \left(\hat{u}_g + \frac{1}{2} v^2 \right) \rho_g \cdot v |_x A + (\hat{q} |_{x + \Delta x} - \hat{q} |_x) A - \rho_g \cdot v \cdot g \cdot V + (p \cdot v |_{x + \Delta x} - p \cdot v |_x) A + (\tau_{xx} \cdot v |_{x + \Delta x} - \tau_{xx} \cdot v |_x) A - \Phi_q \cdot V = 0$$

(3.2-38)

Auf Grund der physikalischen Gegebenheiten in einem porösen System lassen sich weitere Vereinfachungen durchführen:

- a) Vernachlässigung der kinetischen Energie wegen der Quadrierung kleiner Geschwindigkeiten
- b) Vernachlässigung der Arbeit durch Zähigkeitskräfte, da sowohl η_g , als auch die Änderung der Geschwindigkeit im vorliegenden Fall sehr klein sind.
- c) Vernachlässigung der potentiellen Energie.

So ergibt sich mit der Division der Gleichung (3.2-38) durch

$$V = A \cdot \Delta x \quad (3.2-39)$$

und dem Einsetzen der auf das Volumen bezogenen Enthalpie des Gases

$$\rho_g \cdot h_g = \rho_g \cdot \hat{u}_g + p \quad (3.2-40)$$

die Bilanz in Differenzenform zu

$$\frac{\rho \cdot \hat{u} \big|_{\tau + \Delta \tau} - \rho \cdot \hat{u} \big|_{\tau}}{\Delta \tau} + \frac{\rho_g \cdot v \cdot h_g \big|_{x + \Delta x} - \rho_g \cdot v \cdot h_g \big|_x}{\Delta x} + \frac{\dot{q} \big|_{x + \Delta x} - \dot{q} \big|_x}{\Delta x} - \Phi_q = 0 \quad (3.2-41)$$

Der Grenzübergang $\Delta \tau \rightarrow 0$ und $\Delta x \rightarrow 0$ führt zur Differentialgleichung für die Energiebilanz des offenen Systems

$$\rho \frac{\partial \hat{u}}{\partial \tau} + \frac{\partial (\rho_g \cdot v \cdot h_g)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \dot{q} - \Phi_q = 0 \quad (3.2-42)$$

mit

$$\hat{u} = \rho \cdot c \cdot \vartheta \quad (3.2-43)$$

und

$$\dot{q} = -\lambda \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \quad (3.2-44)$$

Daraus ist zu entnehmen, daß zur Berechnung dieser Bilanz die Stoffwerte Dichte ρ , spez. Wärmekapazität c , Wärmeleitfähigkeit λ sowie die Bedingungen für den Quellterm Φ_q bekannt sein müssen.

3.2.5 Die Stoffwerte

Die Berechnung des vorgestellten Gleichungssystems erfordert Kenntnisse über Größe und Abhängigkeit der benötigten Stoffwerte, die sich aus Temperatur, Dichte, Struktur, Feuchtigkeit und Zersetzungsgrad ergeben können.

Nachfolgend werden diese Abhängigkeiten näher erläutert und in Zusammenhang mit den hier vorgestellten Untersuchungen gebracht.

Der allgemein kaum erforschte Bereich der thermischen Zersetzung wird nach der Mischungsregel behandelt, d.h. daß der jeweilige Stoffwert im Bereich der Zersetzung ξ_Z in Abhängigkeit von der Dichte ρ_Z und den Ausgangsgrößen für Holz und Holzkohle für den gleichen thermodynamischen Zustand durch

$$\xi_Z = \frac{\rho_Z - \rho_C}{\rho_H - \rho_C} (\xi_H - \xi_C) + \xi_C \quad (3.2-45)$$

beschrieben wird.

3.2.5.1 Die Dichte

Die Dichte eines Holzkörpers setzt sich aus verschiedenen Komponenten zusammen. Dabei sind Art und Anteil von der jeweiligen Holzart, seiner Entstehungsgeschichte und seinem Lagerungszustand abhängig. Grundsätzlich lassen sich die folgenden Komponenten unterscheiden:

- a) feste Holzsubstanz bestehend aus Lignin, Kohlehydraten und Zellulose
- b) eingeschlossenes Gas, zumeist Luft, Wasserdampf und Zersetzungsprodukte
- c) Wasser
- d) Harze, Wachse, Teere usw.

Daraus ergibt sich der allgemeine Zusammenhang für die Masse des feuchten

Holzkörpers.

$$m_u = m_f + m_w + m_g + m_{\text{sonst.}} \quad (3.2-46)$$

Bei Vernachlässigung der unter d) aufgeführten Stoffe und Division durch das Volumen der feuchten Holzsubstanz V_u ergibt sich die Dichte des feuchten Holzkörpers

$$\rho_u = \epsilon_{fu} \cdot \rho_f + \epsilon_{gu} \cdot \rho_g + \epsilon_w \cdot \rho_w \quad (3.2-47)$$

unter Berücksichtigung der Volumenanteile am Gesamtvolumen

$$\epsilon_{fu} = \frac{V_f}{V_u} \quad \epsilon_{gu} = \frac{V_g}{V_u} \quad \epsilon_w = \frac{V_w}{V_u} \quad (3.2-48 \text{ bis } 50)$$

mit

$$V_u = V_d (1+b) \quad (3.2-51)$$

Der Ausdruck $(b \cdot V_d)$ gibt die Volumenvergrößerung durch Quellung wieder, wobei leicht einzusehen ist, daß diese von der Darrdichte und der Feuchtigkeit abhängen muß. Die Größe b , die als das Maß für die Volumenexpansion anzusehen ist, wurde aus Trocknungsversuchen mit Proben vorgegebener Feuchtigkeit bestimmt. Dabei wurde festgestellt, daß bei scharfer Trocknung, wie sie bei Aufheizprozessen im Brandfall vorkommen, Schwindspannungen und -risse eine Volumenkontraktion auf das mögliche Mindestmaß verhindern und im Mittel nach der Beziehung

$$b = 0,0006 \cdot \frac{\rho_d}{\text{kg m}^{-3}} u \quad (3.2-52)$$

ablaufen /49/.

So ergibt sich die Dichte feuchten Holzes für hohe Aufheizgeschwindigkeiten nach folgender Gleichung:

$$\rho_u = \rho_d \frac{(1+u)}{(1+b)} = \rho_d \frac{(1+u)}{1 + (0,0006 \rho_d \cdot u)} \quad (3.2-53)$$

Dieser gebräuchliche Ausdruck berücksichtigt jedoch ausschließlich die Volumenexpansion durch Quellung, nicht aber die inneren Veränderungen, d.h. die Verengungen des Porenraumes durch Quellspannungen. Diese werden von Stamm /87/ wie folgt beschrieben:

$$\varepsilon_{gu} = 1 - \frac{\rho_d}{1+b} \left[\frac{1}{\rho_f} + \frac{u_{hyg}}{\rho_{w,hyg}} + \frac{u_{frei}}{\rho_{w,frei}} \right] \quad (3.2-54)$$

Mit diesem Ausdruck kann die Porosität feuchten Holzes in Abhängigkeit vom Anteil des Feststoffes, des adsorbierten und des freien Wassers im Körper ermittelt werden. Dabei ergeben sich die Anteile für einen Körper mit hygroskopisch gebundener Feuchtigkeit zu

$$\varepsilon_{fu} = \frac{\rho_d}{\rho_f (1+b)} \quad (3.2-55)$$

$$\varepsilon_{w,hyg} = \frac{\rho_d \cdot u_{hyg}}{\rho_{w,hyg} (1+b)} \quad (3.2-56)$$

$$\varepsilon_{w,frei} = 0 \quad (3.2-57)$$

Die Dichte des sorbierten Wassers ist, wie in Kap. 2.1.3 ausgeführt wurde, höher als bei freiem Wasser. Ihre Abhängigkeit von der Feuchtigkeit kann aus Abb. 3.8 entnommen werden.

Werden diese Beziehungen in Gl.(3.2-47) eingesetzt, so folgt

$$\rho_u = \left[1 - \frac{\rho_d}{1+b} \left(\frac{1}{\rho_f} + \frac{u_{hyg}}{\rho_{w,hyg}} \right) \right] \rho_g + \frac{\rho_d \cdot u_{hyg}}{1+b} + \frac{\rho_d}{1+b} \quad (3.2-58)$$

Nach Beendigung der Trocknung vereinfacht sich die Berechnung auf die

Bedingung gedarrten Holzes

$$\rho_d = \epsilon_{gd} \cdot \rho_g + \epsilon_{fd} \cdot \rho_f \quad (3.2-59)$$

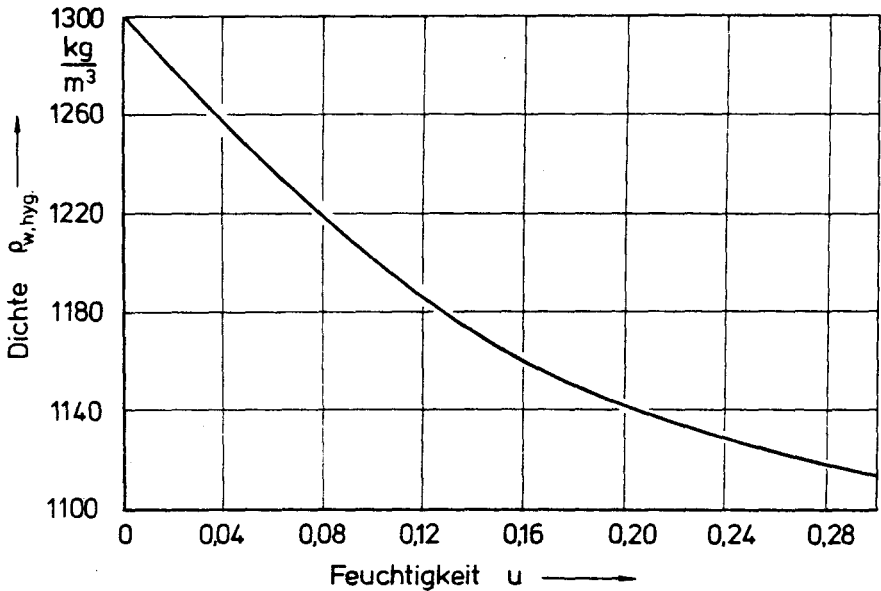


Abb. 3.8 : Abhängigkeit der Dichte sorbierten Wassers vom Feuchtigkeitsgehalt bei Holz /87/.

wobei zunehmend die thermische Zersetzung der Zellwand berücksichtigt werden muß.

Dabei wird die Holzsubstanz in flüchtige und feste Bestandteile (Holzkohle, CO, CO₂, CH₄ usw.) zerlegt.

Die Wirkung dieses Vorganges auf die Gesamtdichte kann näherungsweise als Porositätsänderung aufgefaßt werden, da die Reindichten von Holz

und Holzkohle annähernd gleich sind, wie aus Tabelle 3.1 hervorgeht. Die Reindichten für Holz wurden mit Gleichungen von Raczkowski und Stempiß /74/ berechnet, die die Abhängigkeit von der Darrdichte wiedergeben. Die zugrundegelegten Untersuchungen beruhen auf Versuchen in Wasser (polar) und Toluol (nicht polar), die auf Grund ihres Verhaltens gegenüber Holz unterschiedliche Ergebnisse erbrachten:

In Wasser gemessen:

$$\frac{\rho_{f,w}}{\text{kg m}^{-3}} = 1538,4 + 67,9 \log \left(\frac{\rho_d}{\text{kg m}^{-3}} 10^{-3} \right) \quad (3.2-60)$$

In Toluol gemessen:

$$\frac{\rho_{f,\text{Tol}}}{\text{kg m}^{-3}} = 1468,4 + 110,6 \log \left(\frac{\rho_d}{\text{kg m}^{-3}} 10^{-3} \right) \quad (3.2-61)$$

Nach Kollmann /49/ liefern Versuche mit Wasser auf Grund der großen Verdichtung an der Zellwand zu große und mit nichtpolaren Flüssigkeiten zu kleine Werte. Aus Versuchen mit Helium ist zu entnehmen, daß die reale Dichte jeweils dazwischen liegt. So wurden in Tabelle 3.1 die Mittelwerte nach

$$\bar{\rho}_f = \frac{\rho_{f,w} + \rho_{f,\text{Tol}}}{2} \quad (3.2-62)$$

berechnet.

Art	ρ_d in kg/m^3 /49/	ρ_f in kg_f/m_f^3	ρ_c in kg_c/m_c^3 /31/
Birke	460 - 800	1474 - 1495	1460 - 1520
Fichte	300 - 640	1457 - 1486	1400 - 1510
Tanne	320 - 710	1460 - 1490	1350 - 1490

Tabelle 3.1 : Reindichten von Holz und Holzkohle in Abhängigkeit von der Darrdichte.

Daraus folgt für die zeitlich Änderung der Gesamtdichte des trockenen, sich langsam zersetzenden Stoffes

$$\frac{\Delta \rho_d}{\Delta \tau} = \frac{\Delta (\epsilon_g \cdot \rho_g)}{\Delta \tau} + \frac{\Delta (\epsilon_f \cdot \rho_f)}{\Delta \tau} \quad (3.2-63)$$

Unter der Voraussetzung, daß $\rho_g \ll \rho_f$ ist, und dem Grenzübergang $\Delta \tau \rightarrow 0$ ergibt sich eine alleinige Änderung der Dichte mit der Zellsubstanz

$$\frac{\partial \rho_d}{\partial \tau} = \frac{\partial (\epsilon_f \cdot \rho_f)}{\partial \tau} \quad (3.2-64)$$

Dieser Ausdruck läßt sich mit Gleichung (2.2) und den beschriebenen Voraussetzungen berechnen.

$$\frac{\partial (\epsilon_f \cdot \rho_f)}{\partial \tau} = -k [(\epsilon_f \cdot \epsilon_c) \rho_f]^n \quad (3.2-65)$$

Dabei ist ϵ_c der Volumenanteil des Kohlenstoffs am Gesamtvolumen, dessen Abnahme bei der Zersetzung nicht berücksichtigt wird.

$$\epsilon_c = \frac{V_c}{V} \quad (3.2-66)$$

Die Dichte des Kohlenstoffs wird mit 20 % der Darrdichte angenommen, wie sie sich aus eigenen und anderen Arbeiten / 7/ ergab, während die Gasdichte jeweils mit Lufteigenschaften berechnet wird.

3.2.5.2 Die spez. Wärmekapazität

Die Kenntnis der spez. Wärmekapazität ist für ein instationäres Problem von entscheidender Bedeutung, da durch sie die Speicherefähigkeit eines Stoffes für Wärme beschrieben wird. Dabei wird bei Berechnungen meist die mittlere spez. Wärmekapazität zwischen 0°C und der Stofftemperatur verwendet, die sich durch Integration über diesen Temperaturbereich aus der wahren zu

$$c_m = \frac{1}{\vartheta} \int_{0^{\circ}\text{C}}^{\vartheta} c \cdot dt \quad (3.2-67)$$

ermitteln läßt.

Diese Größe ändert sich bei Holz mit Temperatur, Feuchtigkeit und Zusammensetzung, was durch Untersuchungen bestätigt wurde.

So hat Dunlap /21/ aus experimentellen Untersuchungen einen linearen Zusammenhang zwischen wahrer spez. Wärmekapazität und Temperatur im Bereich von 0°C bis 100°C

$$\frac{c_{0-100}}{\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}} = 1.1137 + 0.00486 \frac{\vartheta}{^{\circ}\text{C}} \quad (3.2-68)$$

für trockene Hölzer ermittelt.

Die Abhängigkeit von der Feuchtigkeit u wurde durch Kollmann /47/ durch Anwendung der Mischungsregel hergestellt und ergab die Beziehung

$$c_u = \frac{u \cdot c_w + c}{1 + u} \quad (3.2-69)$$

Das Verhalten der spez. Wärmekapazität über 100°C wurde, wie schon in Kap. 2.2 beschrieben wurde, von Havens /34/ erforscht. Hier wurden Thermogramme aufgenommen, die die Abhängigkeit der zur Aufheizung eines Stoffes um 1 K erforderliche Energie von der Temperatur wiedergeben.

Sie wurden für Kiefern- und Eichenholz hergestellt und zeigen bis etwa 200 °C einen annähernd linearen Verlauf, der sich im darüberliegenden Temperaturbereich stark ändert, woraus geschlossen wurde, daß spürbares Zersetzungsgeschehen eingesetzt hatte. Diese Vermutung wurde durch gravimetrische Messungen erhärtet. Daraus läßt sich entnehmen, daß bis 200 °C der Verlauf der wahren spez. Wärmekapazität gemessen wurde.

Wird im Gegensatz zu Havens, der den Wert für 200 °C als konstant annahm, eine Extrapolation des linearen Verlaufs durchgeführt und eine Mittelwertkurve aufgenommen, so ergibt sich im Zusammenhang mit der von Dunlap angegebenen Gleichung der Verlauf für die wahre spez. Wärmekapazität von trockenem Holz für 0 °C bis 100 °C nach Gl.(3.2-68) und für $\vartheta > 100$ °C näherungsweise zu

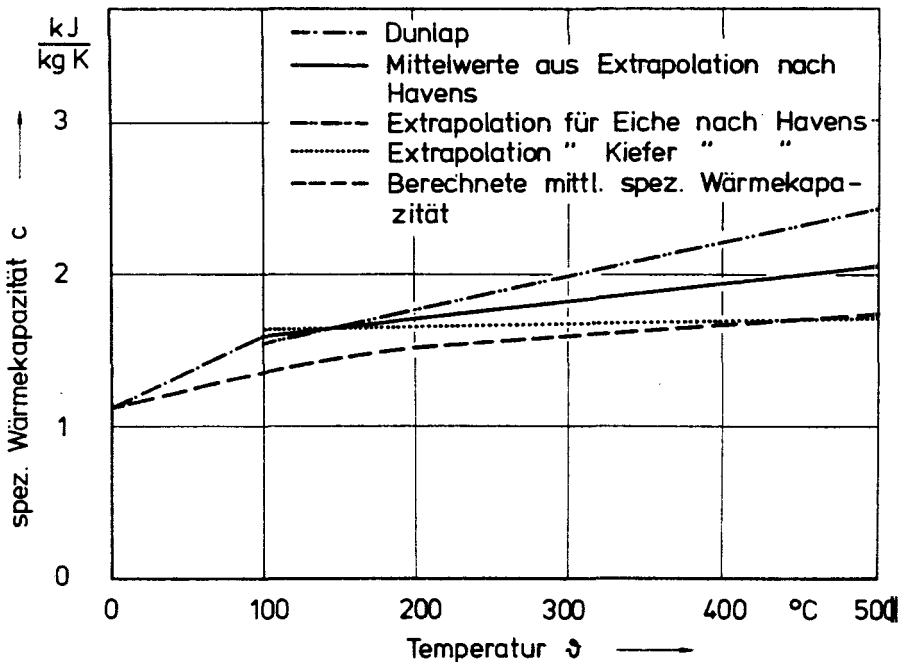


Abb. 3.9 : Darstellung der wahren spez. Wärmekapazitäten aus der Literatur /21,34/ und des daraus berechneten Verlaufs für die mittlere spez. Wärmekapazität.

$$\frac{C_{100 < \vartheta}}{\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}} = 1.5997 + 0.00119 \left(\frac{\vartheta}{^\circ\text{C}} - 100 \right) \quad (3.2-70)$$

Daraus wird durch Berechnung nach Gl.(3.2-67) die in dieser Arbeit verwendete mittlere spez. Wärmekapazität ermittelt, deren Verlauf Abb. 3.9 wiedergibt.

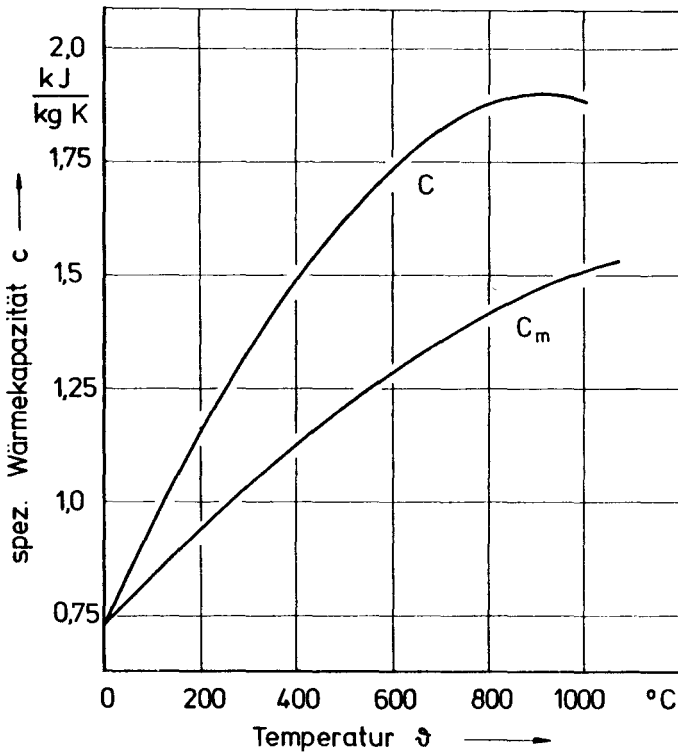


Abb. 3.10 : Wahre und mittlere spez. Wärmekapazitäten von Holzkohle nach /101/.

$$0 \leq \vartheta < 100^{\circ}\text{C}:$$

$$\frac{c_m \text{ } 0 - 100}{\text{kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}} = 1.1137 + 0.00243 \frac{\vartheta}{^{\circ}\text{C}} \quad (3.2-71)$$

$$\vartheta > 100^{\circ}\text{C}:$$

$$\frac{c_m \text{ } \vartheta > 100}{\text{kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}} = \frac{^{\circ}\text{C}}{\vartheta} \left[5.95 \cdot 10^{-4} \left(\frac{\vartheta}{^{\circ}\text{C}} \right)^2 + 1.481 \frac{\vartheta}{^{\circ}\text{C}} - 18.35 \right] \quad (3.2-72)$$

Neben der spez. Wärmekapazität für Holz werden von Beginn der thermischen Zersetzung an die Werte für Holzkohle benötigt, die Untersuchungen von Widell/101/ zu entnehmen und in Abb. 3.10 dargestellt sind.

3.2.5.3 Die Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeit von Hölzern wurde häufig untersucht, wie bereits in Kap. 2.1.3 aufgezeigt wurde, wobei die Versuchstemperaturen in den meisten Fällen unter 100°C liegen.

Aus diesen Untersuchungen lassen sich deutlich einige Abhängigkeiten ableiten, die für die Beurteilung der Wärmeleitfähigkeit entscheidend sind:

Es sind dies Abhängigkeiten von

- a) Dichte
- b) Feuchtigkeit
- c) Lage der Wärmestromrichtung zur Faserrichtung
- d) Temperatur
- e) Struktur

Es konnte gezeigt werden, daß zwischen Wärmeleitfähigkeit und Dichte ein linearer Zusammenhang besteht, der sich durch die allgemeine Gleichung

$$\frac{\lambda}{\text{kJ m}^{-1} \text{s}^{-1} \text{K}^{-1}} = C_1 \frac{\rho}{\text{kg m}^{-3}} + C_2 \quad (3.2-73)$$

beschreiben läßt /49/.

Der Einfluß der Feuchtigkeit wurde ebenfalls eindeutig nachgewiesen, wobei Kollmann und Malmquist /51/ ein Berechnungsverfahren entwickelt haben, das durch statistische Auswertungen experimenteller Untersuchungen im Bereich hygroskopisch gebundener Feuchtigkeit untermauert wurde.

Dieses Verfahren beruht auf der Überlegung, daß der reale Wärmetransport durch Leitung durch zwei Grenzfälle bestimmt wird, der ideal parallel und der ideal senkrecht zur Faserrichtung verlaufenden Wärmestromrichtung. Daraus ergeben sich ein Minimalwert λ_{\min} (ideal senkrecht) und Maximalwert λ_{\max} (ideal parallel), die durch einen Brückenfaktor ψ_1 gekoppelt werden zu

$$\lambda = \psi_1 \cdot \lambda_{\max} + (1 - \psi_1) \lambda_{\min} \quad (3.2-74)$$

Unter Einbeziehung der Ausdrücke für die Grenzwerte ergibt sich so eine Berechnungsvorschrift für die Wärmeleitfähigkeit für Faserstoffe bei der Feuchtigkeit u :

$$\lambda_{\text{ges},u} = \psi_1 \left[\lambda_{g,u} + \frac{\rho_d}{\rho_{f,u}} (\lambda_{f,u} - \lambda_{g,u}) \right] + \frac{(1 - \psi_1) \lambda_{g,u} \cdot \lambda_{f,u}}{\lambda_{f,u} - \frac{\rho_d}{\rho_{f,u}} (\lambda_{f,u} - \lambda_{g,u})} \quad (3.2-75)$$

Die Untersuchung von Kollmann und Malmquist bezog sich auf Umgebungstemperatur (20°C). Kühlmann /60/ erweiterte das Modell auf den Einfluß der Diffusion und deren Temperaturabhängigkeit nach Krischer /56/. So läßt sich die Wärmeleitfähigkeit des feuchten Gases $\lambda_{g,u}$ folgendermaßen beschreiben:

$$\begin{aligned} \lambda_{g,u} = & \psi_2 \left[\psi_3 \cdot \lambda_{g,t} + (1 - \psi_3) (\lambda_{g,t} + \lambda_{\text{Diff.}}) \right. \\ & \left. + (1 - \psi_2) \left[\frac{\lambda_{g,t} (\lambda_{g,t} + \lambda_{\text{Diff.}})}{\psi_3 (\lambda_{g,t} + \lambda_{\text{Diff.}}) + (1 - \psi_3) \lambda_{g,t}} \right] \right] \end{aligned} \quad (3.2-76)$$

In dieser Beziehung wird berücksichtigt, daß nebeneinander trockene (Anteil ψ_3) und feuchte Poren (Anteil $(1-\psi_3)$) im Körper vorliegen können, die in Parallel- (ψ_2) oder Serienschaltung ($1-\psi_2$) auftreten.

Der Anteil der Dampfdiffusion λ_{Diff} wird nach

$$\lambda_{\text{Diff.}} = \frac{D_{\text{Diff.}}}{R_D \cdot T} \cdot \frac{p_u}{p_u - p_s} \cdot \frac{dp_s}{d\vartheta} \cdot r \quad (3.2-77)$$

berechnet, wobei der Diffusionskoeffizient D_{Diff} nach Krischer und Rohnalter /57/ aus

$$\frac{D_{\text{Diff}}}{\text{m}^2 \text{ s}^{-1}} = 2.39 \cdot 10^{-5} \left(\frac{T}{273 \text{ K}} \right)^{2.3} \quad (3.2-78)$$

ermittelt wird. Dabei ist der Einfluß der hygroskopischen Bindung auf den Dampfdruck zu berücksichtigen, dessen Abhängigkeit vom Feuchtigkeitsgehalt durch Multiplikation des Sättigungsdruckes p_s mit der relativen Feuchte ϕ_u , die Abb. 3.11 entnommen werden kann, erhalten wird.

Neben der Wärmeleitfähigkeit des eingeschlossenen Gases ändern sich natürlich auch Wärmeleitfähigkeit und Dichte der Zellwand mit dem Feuchtigkeitsgehalt.

Kollmann und Malquist haben unter Annahme, daß Parallel- und Serienschaltung von Zellwand und angelagerter Wasserschicht im Körper vermischt vorliegen, den Mittelwert aus beiden Fällen zur Berechnung der Wärmeleitfähigkeit der feuchten Zellwand

$$\lambda_{f,u} = 0,5 \left[\frac{\lambda_{f,t} + 1,5 u \cdot \lambda_w}{1 + 1,5 u} + \frac{\lambda_{f,t} \cdot \lambda_w (1 + 1,5 u)}{\lambda_w + 1,5 u \cdot \lambda_{f,t}} \right] \quad (3.2-79)$$

verwendet, während sie die Reindichte nach

$$\frac{\rho_{f,u}}{\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}} = \frac{1,5 + u}{1 + u} 10^3 \quad (3.2-80)$$

berechnet haben.

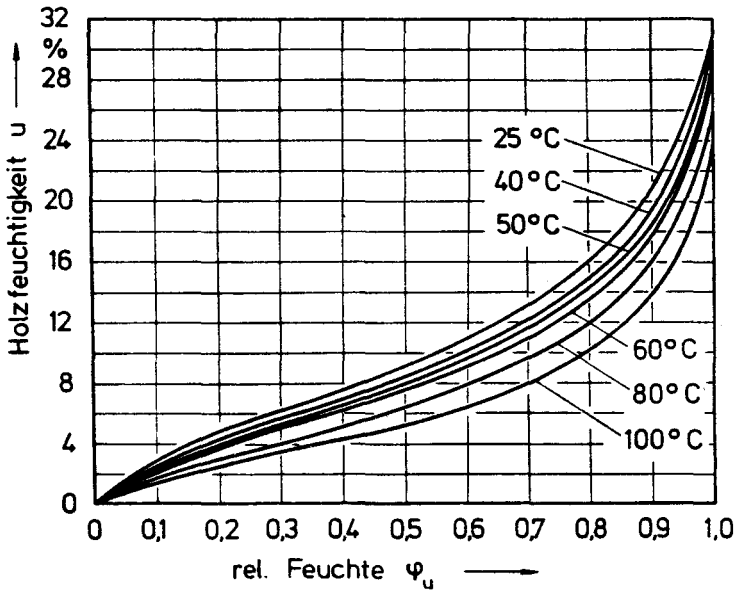


Abb. 3.11 : Desorptionsisothermen für große Stücke von Sitkafichte nach /52,86 /.

Das beschriebene Gleichungssystem wird in der vorliegenden Untersuchung verwendet, da es sowohl den Feuchtigkeits-, als auch den Temperatureinfluß bis 100 °C enthält.

Mit den Zahlenwerten für die Faktoren ψ_1 , ψ_2 und ψ_3 (Tabelle 3.2) so-

wie für den Mittelwert der Wärmeleitfähigkeiten der trockenen Zellwand im Bereich $0^{\circ}\text{C} \leq \vartheta \leq 100^{\circ}\text{C}$ $\lambda_{f,t} = 4.1 \times 10^{-4} \text{ kJ/msK}$ von Kühlmann /60/ ergeben sich Wärmeleitfähigkeiten $\lambda_{ges,u}$ für den senkrecht zur Faser verlaufenden Wärmetransport, die für den Temperaturbereich von 20°C bis 100°C bei verschiedenen Feuchtigkeiten in Abb. 3.12 dargestellt sind.

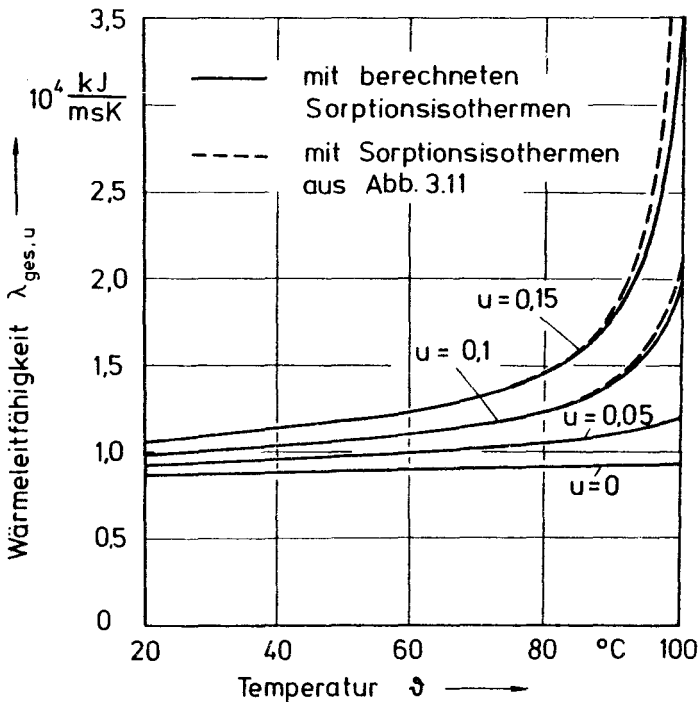


Abb. 3.12 : Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{ges,u}$ in Abhängigkeit von Temperatur und Feuchtigkeit unter Berücksichtigung der Desorptionsisothermen aus Abb. 3.11 und der Näherung aus der vorgelegten Untersuchung

Die Berechnung wurde mit einer Näherung für die Desorptionsisothermen aus Abb. 3.11, die im vorgelegten mathematischen Modell verwendet wird, und mit direkt daraus entnommenen Werten durchgeführt. Dabei zeigt der Vergleich, daß die Näherung bis auf den Bereich von 98 °C bis 100 °C übereinstimmende Ergebnisse erbringt, wobei sich die Frage erhebt, ob der starke Anstieg nahe 100 °C bei höheren Feuchtigkeiten ($u > 0.1$) wirklich erfolgt, da aus diesem Temperaturbereich keine experimentellen Ergebnisse verfügbar sind.

Untersuchungen im Temperaturbereich $\vartheta > 100$ °C wurden von Brown / 7 / an Kiefer mit dem Ergebnis durchgeführt, daß die Wärmeleitfähigkeit zwischen 100 °C und 200 °C konstant blieb ($\lambda = 1.256 \times 10^{-4}$ kJ/msK). Dieser Verlauf und der für Holzkohle im Bereich 345 °C $\leq \vartheta \leq 650$ °C sind in Abb. 3.13 wiedergegeben. Daraus ist zu ersehen, daß die Wärmeleitfähigkeit von Holzkohle mit $\lambda_c = 2.206 \times 10^{-4}$ kJ/msK deutlich über den gemessenen Werten von Fritz und Moser /27/ und Midgeley /67/ lagen. Das wurde damit begründet, daß Brown seine Messungen in der Aufheizphase ohne zwischendurch erfolgte Abkühlung vornahm, wodurch Abkühlungsrisse und somit zusätzliche Transportwiderstände vermieden wurden.

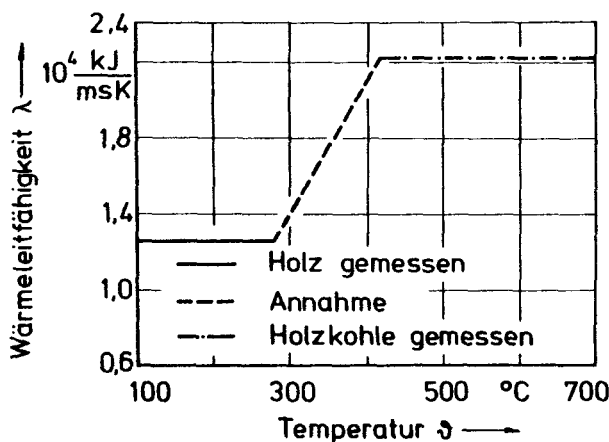


Abb. 3.13 : Wärmeleitfähigkeiten von Kiefernholz und -holzkohle in Abhängigkeit von der Temperatur nach / 7 /

Der in Abb. 3.13 wiedergegebene Verlauf liegt tendenziell dem mathematischen Modell zugrunde.

u	ψ_1	ψ_2	ψ_3
0	0.51	-	-
0.14	0.52	0.034	0.8
0.27	0.53	0.031	0.52

Tabelle 3.2 : Faktoren zur Berechnung der Wärmeleitfähigkeit von feuchtem Holz nach /60/ für den Wärmetransport senkrecht zur Faser

3.2.6 Der Einfluß von Quellen und Senken auf den Aufheizprozeß

Aus der Beschreibung der Einzelprozesse des mathematischen Modells in Kap. 3.2 und der Darstellung der instationären Bilanzen in Kap. 3.2.2 und 3.2.4 ist zu ersehen, daß der gesamte Aufheizprozeß durch Quellterme beeinflusst werden kann, die sich einerseits durch Trocknung und Kondensation und andererseits durch thermische Zersetzung ergeben können.

Der Einfluß der Feuchtigkeit unter Berücksichtigung hygroskopischer Bindung zerfällt in drei Bereiche:

- Heraussprengung des Wassers aus der Bindung mit der Zellwand
- Verdampfung des Wassers
- Kondensation des Wassers.

Der Ort, an dem die beiden ersten Vorgänge auftreten, ist dadurch charakterisiert, daß seine Temperatur 100 °C erreicht hat. Dabei berücksichtigt das Modell Druckerhöhungen in den Poren, die eine Siedetemperaturerhöhung bewirken, nicht.

So ergibt sich örtlich im Falle der Trocknung ein Quellterm für die Massenbilanz des Gases

$$\Phi_{g,T} = \rho_d \frac{\Delta u}{\Delta \tau} \quad (3.2-81)$$

der aus der Masse des verdampften Wassers resultiert.

Die zur Verdampfung des gebundenen Wassers erforderliche Energie wird dabei nach Erreichen der Siedetemperatur in der Verdampfungszone aus der weiteren herantransportierten Wärme abzüglich des für den Weitertransport erforderlichen Anteils bereitgestellt. Dabei wird ein Anteil zum Heraussprengen des Wassers aus der Zellwand benötigt. Er läßt sich nach Katz /43/ aus der Beziehung

$$\frac{q_{\text{hyg}}}{\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}} = \frac{C_1 \cdot u}{C_2 + u} \cdot \frac{\rho_d}{\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}} \quad (3.2-82)$$

unter Verwendung der von Kollmann /48/ ermittelten Konstanten $C_1 = 92$ und $C_2 = 0.07$ berechnen. Damit ergibt sich für die erforderliche Desorptionsenergie zur Freisetzung sorbierten Wassers zwischen zwei Feuchtigkeitsgrenzen u_α und u_ω der folgende Zusammenhang

$$\frac{\Delta q_{\text{hyg}}}{\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}} = 6.45 \frac{(u_\alpha - u_\omega) \frac{\rho_d}{\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}}}{(0.07 + u_\alpha) (0.07 + u_\omega)} \quad (3.2-83)$$

Der zweite Anteil, der die Verdampfung berücksichtigt, wird aus

$$\Delta q_D = \rho_d \cdot \Delta u \cdot r \quad (3.2-84)$$

ermittelt. Aus der Addition beider Terme folgt der Quellterm für die Energiebilanz

$$\phi_{q,T} = \frac{\Delta q_{\text{hyg}} + \Delta q_D}{\Delta \tau} \quad (3.2-85)$$

Wird nun davon ausgegangen, daß ein Teil des freiwerdenden Dampfes wegen der dadurch entstehenden örtlichen Druckerhöhung in den kälteren Bereich gelangt, so wird er dort kondensiert.

Daraus folgt, daß der im Zeitintervall $\Delta\tau$ in diesem Bereich eintretende mittlere Gasstrom

$$\dot{m}_{g,u} = \rho_{g,u} \cdot v \cdot A \quad (3.2-86)$$

seinen Dampfanteil

$$\dot{m}_D = x_D \cdot \rho_{g,u} \cdot v \cdot A \quad (3.2-87)$$

abgibt, so daß nur noch trockenes Gas¹⁾ mit der Dichte

$$\rho_{g,t} = (1 - x_D) \rho_{g,u} \quad (3.2-88)$$

weitertransportiert wird. Im Bereich der Kondensation verbleibt somit im Zeitintervall $\Delta\tau$ die Wassermasse

$$m_{w,Kond.} = x_D \cdot \rho_{g,u} \cdot v \cdot A \cdot \Delta\tau \quad (3.2-89)$$

Daraus folgt mit

$$m_{w,Kond.} = \rho_d \cdot \Delta u \cdot V \quad (3.2-90)$$

und der Division durch das Gesamtvolumen V die Änderung der Feuchtigkeit in der Zeit $\Delta\tau$

$$\Delta u = \frac{x_D \cdot \rho_{g,u} \cdot v \cdot \Delta\tau}{\rho_d \cdot \Delta x} \quad (3.2-91)$$

Für die Massenbilanz des Gases ergibt sich der Term für die Senke im Kondensationsbereich somit aus

$$\Phi_{g,Kond.} = \frac{x_D \cdot \rho_{g,u} \cdot v}{\Delta x} \quad (3.2-92)$$

1) Voraussetzung aus Gründen vereinfachter Berechnung

und für die Energiebilanz aus Gl.(3.2-76) und den Gleichungen für den Quellterm

$$\Phi_{q,Kond.} = \Phi_{q,T} \quad (3.2-93)$$

d.h. daß hier die Annahme zugrundeliegt, daß nach der Kondensation auch wieder eine hygroskopische Bindung eingegangen wird.

Bei weiterer Aufheizung über 100 °C hinaus beginnt die thermische Zersetzung, die eine Änderung der Dichte der Zellwand bezogen auf das Gesamtvolumen bewirkt. Dabei wird Gas ebenfalls freigesetzt, dessen Zustrom in den Porenraum nach Gl.(3.2-65) mit dem Quellterm

$$\Phi_{g,Z} = \frac{\partial (\epsilon_f \cdot \rho_f)}{\partial \tau} \quad (3.2-94)$$

beschrieben wird.

Der Term für die Energiebilanz ergibt sich daraus durch Multiplikation mit der Reaktionsenthalpie q_Z zu

$$\Phi_{q,Z} = \Phi_{g,Z} \cdot q_Z \quad (3.2-95)$$

Wegen der großen Streuung der bekannten reaktionskinetischen Daten werden diese in Vergleichsrechnungen ermittelt.

3.3 Lösungsmethode und Rechenprogramm

Das dargestellte Modell wird in seiner Gesamtheit durch ein nichtlineares Differentialgleichungssystem beschrieben, das analytisch nicht mehr lösbar ist.

Aus diesem Grund muß auf ein numerisches Lösungsverfahren zurückgegriffen werden. Dabei hat sich in den bisher bekannten Arbeiten (s. Kap. 2)

das implizite Differenzenverfahren nach Crank und Nicolson /13/ bewährt, da es auch bei auftretenden Quellen und Senken sowie Änderungen von Orts- und Zeitschrittweite stabil bleibt /85/. Die erforderliche Beziehung für den Wärmeübergang wurde von Crank /12/ genau beschrieben.

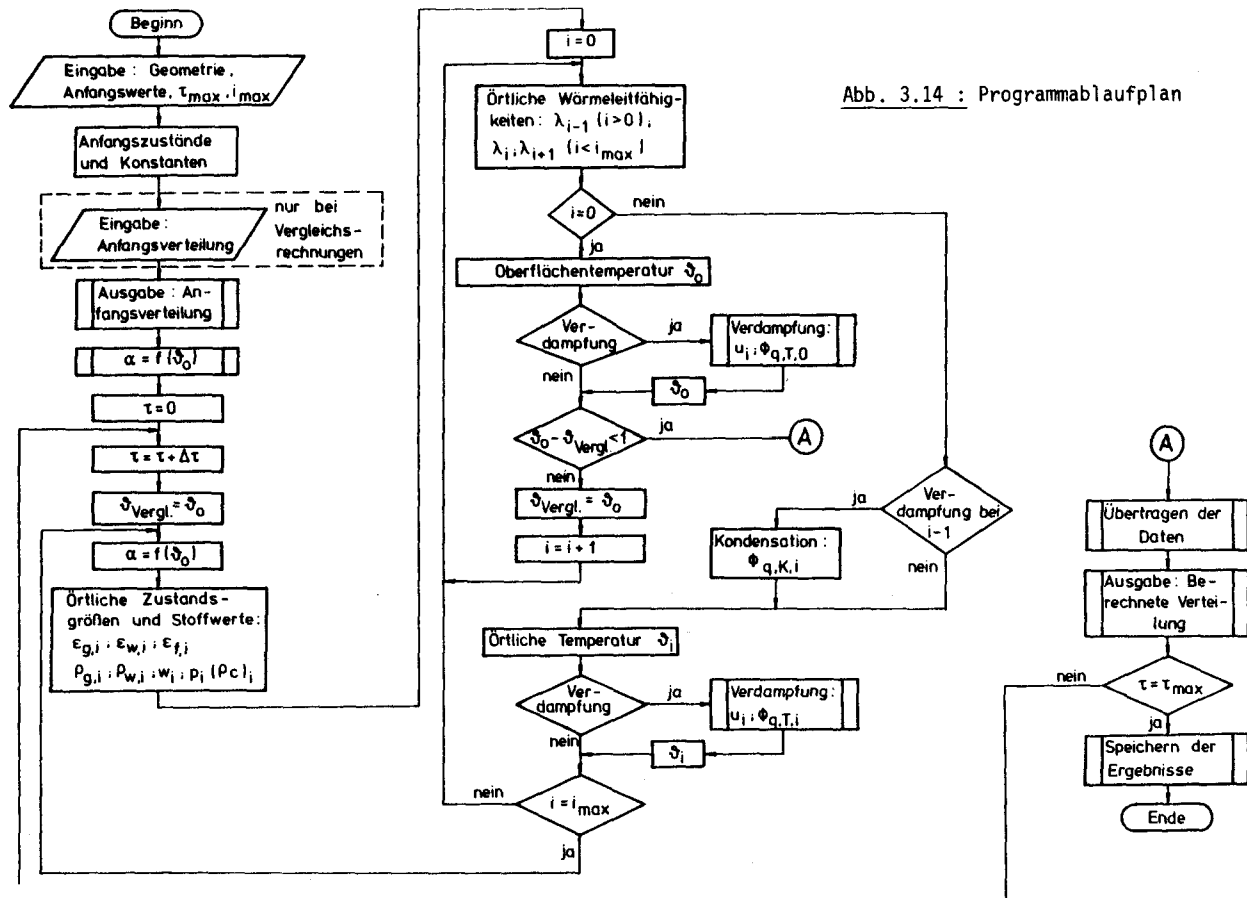
Im vorliegenden Fall wird das Verfahren zur Lösung der Energiebilanz verwendet, in deren Iteration die Berechnung der Massenbilanz eingebunden ist, die jedoch innerhalb dieses Ablaufs nur mit einer einfachen Iteration zum aktuellen Zeitpunkt durchgeführt wird.

Mit dem so erstellten System von Differenzengleichungen wird in der Programmiersprache Basic ein Rechenprogramm erstellt, dessen Programmablauf durch Abb. 3.14 wiedergegeben wird.

Dieses Programm wird auf einem Prozeßrechner DIETZ MC 621/8 mit 48 kbyte Kernspeicherplatz eingesetzt. Wegen des begrenzten Speicherplatzes muß eine Segmentierung des Programms durchgeführt werden. Aus diesem Grund werden drei Programmteile, das Übertragen der aktuellen Datenfelder in Felder für die Ausgangswerte des nächsten Zeitschrittes, die Ausgabe und das Speichern der Ergebnisse, in den Overlay-Bereich abgelegt. Der Rest des Programms liegt als Wurzel im Kernspeicher.

Durch diese Maßnahmen, die Grundschnelligkeit des Rechners und das Iterationsverfahren müssen lange Laufzeiten (Rechenzeit/Prozeßzeit > 25) in Kauf genommen werden, die jedoch wegen der phänomenologischen Natur des vorliegenden Programms unerheblich sind.

Die Orts- und Zeitschrittweiten werden mit $\Delta x = 1 \text{ mm}$ und $\Delta \tau = 2 \text{ s}$ so gewählt, daß einerseits die Rechenzeit nicht zu hoch und andererseits der Einfluß der eingebauten Parameter ersichtlich wird. Außerdem ist es bei der Genauigkeit der Maschine (1 byte = 8 bit) fraglich, ob nicht durch kleinere Intervalle die Ungenauigkeiten durch die interne Darstellung stärker zum Tragen kommt, zumal geringfügige Unterschiede in den Ergebnissen ihren Aussagewert für die vorliegende Untersuchung nicht erhöhen.



4. Experimentelle Untersuchungen

Der Sinn experimenteller Untersuchungen liegt häufig nicht nur in der Erweiterung der Kenntnisse naturwissenschaftlicher bzw. technischer Erscheinungen, sondern darüberhinaus in der Stützung und Bewertung theoretischer Erkenntnisse.

Die nachstehend beschriebenen Versuche dienen dieser weitergehenden Forderung, da bei dem vorliegenden Problem auf Grund der Vielzahl von Einzelprozessen und damit verbundenen Stoffwertveränderungen, deren Abhängigkeiten nicht exakt bekannt sind, große Unsicherheiten in der Bewertung dieser Ergebnisse vorgegeben sind. Diese zu beseitigen würde einen zu großen Aufwand erfordern, wie die vielen punktuellen Untersuchungen aus der Literatur zeigen. So kann im Rahmen dieser Arbeit nur aufgezeigt werden, inwieweit sich die theoretisch ermittelten mit experimentellen Ergebnissen tendenziell decken.

Dabei treten zwei Fragenkomplexe auf:

- A) Welche Größen eignen sich zur Bewertung der Brauchbarkeit des mathematischen Modells unter dem Gesichtspunkt einfacher meßtechnischer Erfassung?
- B) Wie muß eine Anlage dafür beschaffen sein und wie müssen die Versuche durchgeführt werden?

Die geeigneten Größen ergeben sich aus den Ergebnissen des mathematischen Modells, woraus der zeitliche Verlauf folgender Größen, die auch meßtechnisch einfach zu erfassen sind, erhalten wird.

- a) Temperatur
- b) Tiefe des Zersetzungsbereichs
- c) Tiefe der Verkohlungszone
- d) Gewichtsverlust

Diese Liste ließe sich umfangreicher gestalten, wobei jedoch der versuchstechnische Aufwand erheblich erweitert werden müßte. Aus diesem Grund werden die experimentellen Untersuchungen auf die angegebenen Größen beschränkt. Weiterhin werden die Versuche in inerter Atmosphäre bei konstanten Ofentemperaturen durchgeführt, um den Einfluß der Ofendynamik und der Verbrennungsreaktionen ausschließen zu können und somit zu überschaubaren Wärmeübertragungsverhältnissen zu gelangen.

4.1 Die Versuchseinrichtung

Die Versuchseinrichtung (Abb. 4.1) besteht aus einem elektrisch beheizten Muffelofen, einer Vorkammer mit Probenhalterung und der Meßeinrichtung.

4.1.1 Ofen und Vorkammer

Der Muffelofen ist ein handelsübliches Gerät mit den Innenraumabmessungen 260 x 160 x 400 mm. An seiner Frontseite befindet sich eine Öffnung, die durch eine schwenkbare Klappe verschlossen wird. In diese Klappe ist ein Rohr eingeschoben, das über einen Schlauch mit einer Stickstoffgasflasche verbunden ist, um Inertgas in den Ofenraum einblasen zu können. An der Rückseite der Muffel liegt eine weitere Öffnung, in die eine kreuzförmige Absaugsonde eingeführt ist. Dieses Kreuz liegt in der Muffel unterhalb der Decke, so daß ein möglichst großer Bereich im Ofen von der Absaugung erfaßt werden kann. Es ist an eine Leitung angeschlossen, durch die das Gas einem Gasanalysengerät für Sauerstoff (Magnos 5T) zugeführt wird. Auf dieser Strecke wird das Abgas für die Analyse aufbereitet, indem es zuerst in einem Wasserbad gereinigt und gekühlt wird. Dann wird es zur Trocknung und weiteren Reinigung durch einen Trockenturm, der zur Entfeuchtung Kieselgel enthält, geschickt, um letztlich noch einmal mit Hilfe eines Papierfilters gereinigt zu werden. Das so aufbereitete Gas kann danach analysiert werden.

Da die Versuche unter der Voraussetzung konstanter Ofenraumtemperatur in inerte Atmosphäre durchgeführt werden, muß der Ofen zu Beginn des Versuchs hinsichtlich Temperatur und Konzentration der Atmosphäre im stationären Zustand sein. Die Öffnung der Klappe zur Einführung der kalten Probe würde jedoch die Sauerstoffkonzentration auf Grund des Temperaturunterschiedes von Ofenraum und Umgebung in der Muffel erhöhen und somit undefinierte Randbedingungen entstehen lassen.

Aus diesem Grund wird eine Vorkammer vor die Ofenluke gesetzt, die sowohl mit der Stickstoffzufuhr, als auch der Gasabsaugung verbunden ist. So kann in diesem Raum ebenfalls eine inerte Atmosphäre erzeugt und überwacht werden, womit gewährleistet ist, daß beim Öffnen der Klappe ausschließlich Stickstoff in den Versuchsraum einströmen kann.

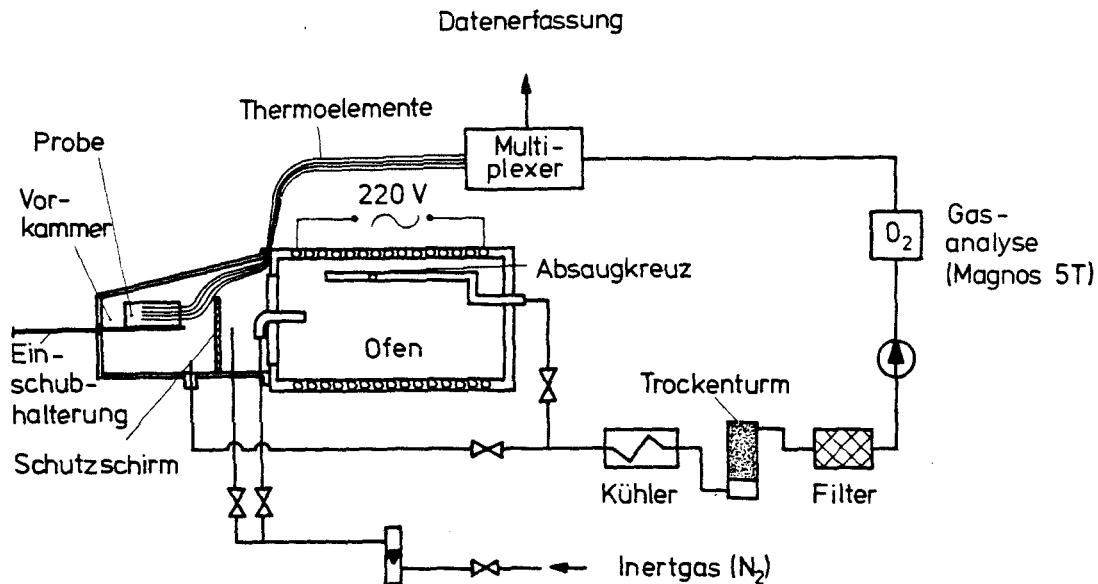


Abb. 4.1 : Schematische Darstellung der Versuchseinrichtung

In der der Luke gegenüberliegenden Wand der Vorkammer ist die Einschubhalterung angebracht, durch die die Probe, die auf eine Gabel gesetzt wird, von außen in den Ofenraum geschoben werden kann.

Bis zu diesem Zeitpunkt wird zwischen Probe und Ofenwand ein Schutzschirm gesetzt, der die direkte Zustrahlung von der Wand an die Probe verhindert, so daß eine begrenzte Aufheizung nur noch durch Kammeratmosphäre und -wand gegeben ist.

4.1.2 Die Meßeinrichtung

Die Messungen werden teilweise während des Versuchs und teilweise danach durchgeführt.

Während des Versuchs:

- a) Sauerstoffgehalt in Vorkammer und Ofenmuffel
- b) Stickstoffmassenstrom
- c) Temperaturverlauf im Ofen und in der Probe

Nach dem Versuch:

- a) Gewichtsverlust der Probe
- b) Tiefe des Zersetzungs- und Verkohlungsbe-reiches

Die Sauerstoffmessungen werden mit einem Gasanalysator (Magnos 5T) durchgeführt, der einen Meßbereich von 0 bis 21 % besitzt und ein Ausgangssignal von maximal 20 mA erzeugt. Dieses Signal wird durch einen Widerstand von 2,5 Ω geschickt, so daß darüber eine Maximalspannung von 50 mV abgenommen werden kann, die durch die vorhandene Datenerfassungsanlage aufgenommen wird. Wie die Messung der Sauerstoffkonzentration wird die Messung des Stickstoffmassenstroms nur zur Einstellung und Überwachung gleichbleibender Verhältnisse benötigt. Dieses geschieht mit einem Rotameter, an dem die erforderlichen Massenströme einmal zur Herstellung der inerten Atmosphäre und anschließend zur Aufrechterhaltung derselben abgelesen werden können.

Der Temperaturverlauf im Ofen wird mit einem Thermoelement mit angeschlossenen Thermostaten geregelt, wodurch die konstante Ofentemperatur unter Berücksichtigung geringer Schwankungen gesichert ist.

Anders sieht die Temperaturmessung in der Probe aus. Hier werden Mantelthermoelemente (Thermocoax) der Paarung NiCr-Ni mit dem Durchmesser 0.25 mm verwendet, wodurch eine geringe Störung des Probengefüges gewährleistet wird. Die Fühler werden von der Probe zwischen Vorkammer

und Ofenwand hindurch zu einem Anschluß an eine abgeschirmte Ausgleichsleitung geführt. Über diese werden die abgegebenen Thermospannungen einem Multiplexer (MU) zugeführt und von dort über einen Analog-Digitalumsetzer (ADU) in einen Prozeßrechner (PR) gegeben, in dem sie in Temperaturen umgerechnet und anschließend auf eine Magnetplatte (MPE) aufgezeichnet werden. Von dort können sie jederzeit ausgedruckt (MD) oder mit einem Plotter (PL) aufgezeichnet werden. Neben der genannten Aufgabe taktet der Prozeßrechner den Multiplexer. Eine schematische Darstellung im Blockschaltbild zeigt Abb. 4.2.

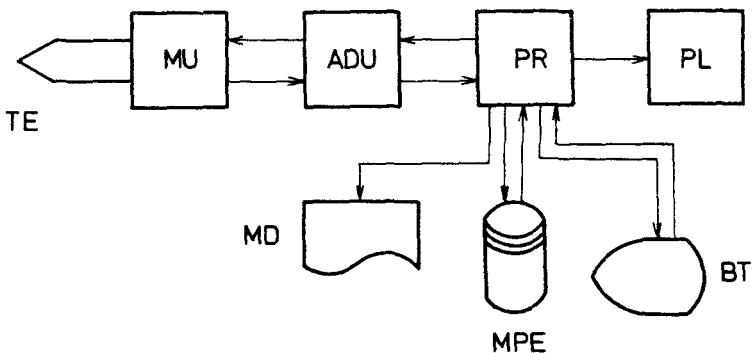


Abb. 4.2: Schematische Darstellung der Datenaufnahme bei der Temperaturmessung in der Probe.

Die Gewichtsverlustmessungen werden auf einer Wägeeinheit mit Digitalanzeige ausgeführt. Die Waage hat einen Wägebereich bis 5 kg bei einer Auflösung von 10^{-4} . Trotz dieser recht groben Auflösung hat die Waage entscheidende Vorteile: Sie ist bei großer Robustheit sehr genau. Diese Eigenschaften kommen der Art der durchgeführten Versuche entgegen, zumal für eine tendenzielle Überprüfung diese Auflösung ausreichend ist.

Den geringsten meßtechnischen Aufwand erfordert die Tiefenmessung, die mit einer Schieblehre durchgeführt wird.

4.1.3 Meßgenauigkeit

Entscheidend für die Erkenntnisse aus experimentellen Untersuchungen ist die Meßgenauigkeit. Sie setzt sich aus mehreren Komponenten zusammen wie

- der Genauigkeit des Meßfühlers
- auftretenden Übertragungsfehlern
- der Genauigkeit des Erfassungsgerätes
- der Genauigkeit des Ausgabemediums
- menschlichen Fehlern

Es ergaben sich aus gerätetechnischer Sicht die in Tabelle 4.1 dargestellten Genauigkeiten, die für den Anspruch der vorliegenden Untersuchungen ausreichend sind.

Gerät	Genauigkeit bzw. Auflösung
Ofentemperaturregelung	$\pm 0.14 \%$ bei 700°C $\pm 0.14 \%$ bei 400°C (Kontrolle mit Thermoelement NiCr-Ni)
Thermoelement NiCr-Ni 0.25 mm (Angabe nach Hersteller)	$<\pm 0.75 \%$ (ISA-Norm) (max. 10% = 2.3 K bei 24°C) (Angabe nach Hersteller)
Übertragung vom Multiplexer bis zur Digitalisierung	s. Abb. 4.3
Magnos 5T Abweichung von der Linearität	$\leq 2 \%$ (Angabe nach Hersteller)
Waage	Auflösung : $10^{-4} \hat{=} 500 \text{ mg}$
Schieblehre	Auflösung : 10^{-1} mm

Tabelle 4.1: Meßgenauigkeiten der verwendeten Geräte

Die Ablesung der Ergebnisse unterliegt menschlichen Fehlern, die im einzelnen nicht erfaßbar sind, jedoch mit einer sorgfältigen Versuchsdurchführung eingeschränkt werden können.



Abb. 4.3: Abhängigkeit des Übertragungsfehlers von der Größe des Meßsignals (umgerechnet in $^{\circ}\text{C}$)

4.2 Aufbau und Vorbereitung der Probe

Die Proben bestehen aus Fichtenholz (*picea excelsa*) mit den Abmessungen 60 x 60 x 20 mm, wobei die Faser längs der großen Flächen verläuft. Diese Holzplatten werden vor dem Versuch einer Vorbehandlung unterzogen, um einerseits möglichst gleiche Feuchtigkeitsprofile und andererseits unterschiedliche Feuchtigkeiten zu erhalten.

So werden die Hölzer 3 Monate im gleichen Raum gelagert und anschließend zur Hälfte in einen luftdicht abgeschlossenen Behälter und zur anderen Hälfte in einen Trockenschrank gelegt. In diesem werden sie bei 106°C 60 Stunden getrocknet und anschließend gleichfalls in einem luftdichten Behälter aufbewahrt, wo sie 14 Tage auf Kieselgel gelagert werden. Nach dieser Zeit soll ein Feuchtigkeitsaustausch stattgefunden haben, so daß von annähernd gleichen Feuchtigkeiten in den Proben ausgegangen werden kann. Danach werden Feuchtigkeitsuntersuchungen nach DIN 52 183 /18/ durchgeführt.

Dazu werden zwei Proben aus jedem Behälter mit einem Stechbeitel zer-spannt und diese Späne im Trockenschrank bei 103°C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Der prozentuale Feuchtigkeitsgehalt u_p ergibt sich danach aus dem Anfangsgewicht G_α und dem Darrgewicht G_ω zu

$$u_p = \frac{G_\alpha - G_\omega}{G_\omega} 100 [\%] \quad (4.2-1)$$

Für die vorliegenden Versuche ergaben sich Feuchtigkeiten von 9.3 % für die unbehandelten und 3.6 % für die getrockneten Proben. Diese Feuchtigkeiten haben sich auf Grund der luftdichten Lagerung über die Gesamtdauer der Versuchsserie nicht geändert. Vor dem eigentlichen Versuch wird die Probe bis auf die exponierte Fläche mit Wasserglas (Na_2SiO_3) versiegelt. Diese Maßnahme soll bei der Aufheizung der unbehandelten Flächen verhindern, daß ein Gastransport über die anderen Flächen, besonders in Faserrichtung, möglich ist. So ergeben sich näherungsweise eindimensionale Bedingungen für den Stofftransport im Probenkörper. Die so vorbehandelte Probe wird bei den Messungen der Tiefen von Zersetzungs- und Verkohlungs-bereich sowie des Gewichtsverlustes verwendet.

Die Temperaturfeldmessungen erfordern darüberhinaus den Einbau von Mantel-Thermoelementen, die hier, wie bereits in Kap. 4.1.2 ausgeführt wurde, mit der Paarung NiCr-Ni und dem Durchmesser 0.25 mm verwendet werden.

Neben der in Kap. 4.1 angesprochenen Meßgenauigkeit der Geräte ist die Güte des Einbaus des Meßfühlers am Meßort wichtig und stellt bei Temperaturmessungen im Holz auf Grund der stark differierenden Wärmeleitfähigkeiten von Probe und Meßfühler ein besonderes Problem dar. Während der Wärmeableitfehler durch Führung des Fühlers senkrecht zur Wärmestromrichtung und der dynamischen Fehler durch kleine Fühlermasse begrenzt werden, können statische Fehler durch Verlauf und Art der Bohrung entstehen, durch die der Fühler an den Meßort geführt wird.

Die Bohrung selbst muß einen Durchmesser besitzen, der möglichst dicht am Fühlerdurchmesser liegt, um die Gefügestörung und den Luftmantel um den Fühlerkopf klein zu halten. Außerdem muß dieser möglichst dicht an der Probenmitte liegen, damit Randeinflüsse auf die Messung ohne Einfluß bleiben. Letztlich muß ein guter Kontakt zwischen Bohrgrund und Fühlerkopf bestehen.

Diese Forderungen können durch eine Bohrung mit einem Drillbohrer nicht erfüllt werden, weil bei Durchmessern von 0.3 mm ein Auswandern und somit eine undefinierte Lage des Bohrgrundes wegen der Faserstruktur des Holzes unvermeidlich sind. Außerdem kann ein sauber gearbeiteter Bohrgrund nicht garantiert werden. So wird eine andere Methode verwendet, die in /78/ vorgeschlagen wird.

Dazu wird eine Nadel parallel zur exponierten Oberfläche in der vorgeschriebenen Tiefe in die Probe gestoßen, wodurch eine konisch zulaufende Bohrung erzeugt wird, in die das Thermoelement so weit gesteckt werden kann, bis der Kopf voll an der Wand anliegt.

Nach dem Einführen der Thermoelemente wird die Probe, wie beschrieben, mit Wasserglas versiegelt, wodurch gleichzeitig die Elemente fixiert werden und das Bohrloch verschlossen wird. Die so vorbereiteten Proben werden in einen Einschubschlitten gesetzt, dessen Aufbau in Abb. 4.4 dargestellt ist.

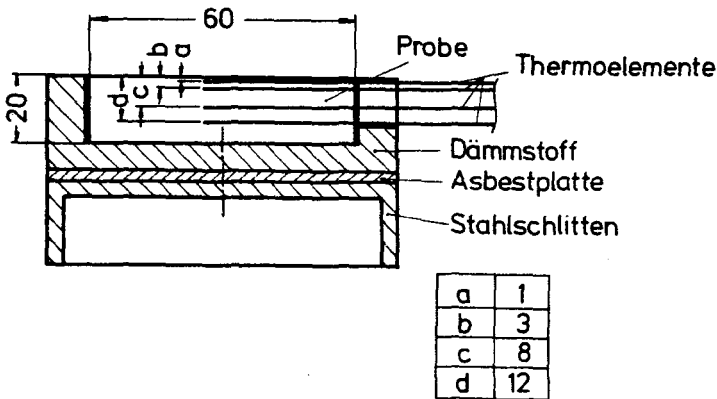


Abb. 4.4: Holzprobe mit Thermoelementen im Einschubschlitten
(alle Maßangaben in mm).

4.3 Versuchsbedingungen und Versuchsdurchführung

Die Versuche werden je nach Untersuchungsgegenstand kontinuierlich oder diskontinuierlich durchgeführt:

Kontinuierlich: Temperaturmessungen

Diskontinuierlich: Messung des Gewichtsverlustes

- der Tiefe des Verkohlungsbereiches
- der Tiefe des Zersetzungsbereiches

Zu Beginn wird die Ofenmuffel auf die gewünschte Temperatur gebracht, wobei hier mit zwei Temperaturen (410°C und 708°C) gearbeitet wird. Der Grund für diese Wahl liegt in vorangegangenen Untersuchungen /19/. Dabei wurde bei Untersuchungen in Luft festgestellt, daß bei einer Ofentemperatur von 400°C die Probe nicht zündet, während bei 700°C eine spontane Zündung erfolgte. Weiterhin wurde bei Untersuchungen in inerter Atmosphäre deutlich, daß bei 400°C nach 10 Minuten zwar Verfärbung der Struktur, jedoch noch keine Verkohlung zu beobachten war. Bei 700°C hingegen war die Probe nach der gleichen Zeit völlig verkohlt. So wurden diese beiden Temperaturen als Bedingungen angesehen, bei denen stark differierende Verhaltensweisen vorliegen. Außerdem können solche Temperaturen bei der Brandentstehung und -ausbreitung auftreten.

Entscheidend für Zündung und Abbrand des Holzes ist das vorangehende Zersetzungsgeschehen. Das Studium dieser Prozesse ist jedoch nur möglich, wenn andere Prozesse wie die Reaktion der Zersetzungsprodukte mit Sauerstoff verhindert werden, so wird hier mit inerte Ofenatmosphäre, in diesem Fall Stickstoff, gearbeitet.

Nach Einstellung der konstanten Ofentemperatur wird der Einschubschlitten mit der Probe in die Halterung gelegt, die Vorkammer gegen die Ofenwand gefahren und Stickstoff in Vorkammer und Muffel geblasen. Mit einer größeren Membranpumpe ($\dot{V} = 200 \text{ l/h}$) wird die Ofenatmosphäre abgesaugt, so daß nach kurzer Zeit der Raum mit Stickstoff gefüllt ist.

Diese Maßnahme ist erforderlich, da sich die Atmosphäre der Vorkammer schnell erwärmt und somit die Probe vorgeheizt wird (s. Kap. 5.1).

Nach Einstellung der Versuchsbedingungen wird die Probe in die Muffel geschoben. Dieses ist der eigentliche Versuchsbeginn. Die Versuchszeit beträgt 10 Minuten, wobei die diskontinuierlichen Messungen zwischen 1 und 10 Minuten mit einer Stufung von 1 Minute beendet werden. Danach werden die Proben sofort mit Schlitten gewogen und anschließend abgeschreckt, zerschnitten und die einzelnen Zonen ausgemessen.

4.4 Versuchsauswertung

4.4.1 Temperaturmessungen

Für die Ermittlung der Temperaturfelder werden je 2 Versuche gefahren. Die daraus resultierenden Ergebnisse werden für jede Meßtiefe und Versuchsbedingung arithmetisch gemittelt und anschließend nach der Methode der kleinsten Quadrate / 2 / geglättet.

4.4.2 Diskontinuierliche Untersuchungen

Die diskontinuierlichen Messungen werden ein- bis dreimal je Zeitschritt durchgeführt, wobei die Anzahl der Versuche jeweils von der Übereinstimmung der einzelnen Meßwerte mit der Tendenz des Gesamtverlaufs bestimmt wird.

Während der Gewichtsverlust nach der Beziehung

$$\Delta G_p = \frac{(G_\alpha + G_{\text{Schlitten}}) - (G_\omega + G_{\text{Schlitten}})}{G_\alpha} \cdot 100 [\%] \quad (4.4-1)$$

explizit ermittelt wird, müssen die Tiefen von Zersetzungs- und Verkohlungszone ausgemessen werden, wobei die Verkohlungszone scharf abgegrenzt sichtbar und somit einer genauen Messung zugänglich ist. Problematischer gestaltet sich hingegen die Messung der Tiefe des Zersetzungsgebietes. Dieser liegt in verschiedenen Verfärbungen vor, die von visuell noch nicht wahrnehmbaren Veränderungen bis hin zur letzten Stufe vor der Verkohlung reicht. Hier wird der visuell erfaßbare Bereich ausgemessen.

Bei dieser Art der Auswertung ist klar, daß bezüglich der Erfassung des Zersetzungsgebietes nur eine grobe Abschätzung der Zone deutlicher Zersetzung subjektiv möglich ist und somit nur als zusätzliche Hilfe bei der Bewertung angesehen werden kann. Die Messung erfolgt jeweils, wie in Abb. 4.5 dargestellt ist, in der Mitte der aufgeschnittenen Probe. Die Ergebnisse werden anschließend einer Ausgleichsrechnung unterworfen /80/, um einen tendenziellen Vergleich ermöglichen zu können.

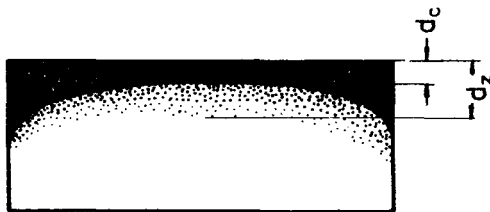


Abb. 4.5: Prinzipielle Darstellung der thermisch belasteten Holzprobe mit Angaben der Verkohlungstiefe d_v und der Tiefe des Zersetzungsgebietes d_z .

5. Diskussion der Ergebnisse

Die Ergebnisse aus den experimentellen Untersuchungen sollen der Stützung und Bewertung des mathematischen Modells dienen, also ein Maß für die Verwendbarkeit und Aussagekraft desselben darstellen.

Dazu ist es erforderlich, die Meßergebnisse ersteinmal für sich zu diskutieren, um festzustellen, ob sie diesem Anspruch gerecht werden können.

Erst danach ist ein Vergleich mit den Ergebnissen des mathematischen Modells und seine Anpassung sinnvoll.

5.1 Meßergebnisse

Die gemessenen Temperaturfelder sind in den Abb. 5.1 und 5.2 dargestellt. Sie zeigen für alle Versuchsbedingungen zu Beginn der Messung Temperaturverteilungen, die von der gleichmäßigen Anfangsverteilung bei Raumtemperatur deutlich abweichen. Daraus folgt, daß während der Wartezeit in der Vorkammer trotz des Schutzschirmes jeweils eine stärkere Beheizung der Proben stattgefunden hat, als vorausgesehen wurde.

Allerdings lassen die zu einer Ofentemperatur gehörigen Anfangstem-

$\vartheta_U / ^\circ\text{C}$	410		708	
Tiefe/mm \ u_p	3.6	9.3	3.6	9.3
1	93	83	198	183
3	46	39	79	51
8	31	33	33	35
12	27	32	31	31

Tabelle 5.1: Gemessene Anfangstemperaturverteilungen (in $^\circ\text{C}$) in Abhängigkeit von den Versuchsbedingungen Ofentemperatur ϑ_U und Feuchtigkeit u_p in verschiedenen Meßtiefen

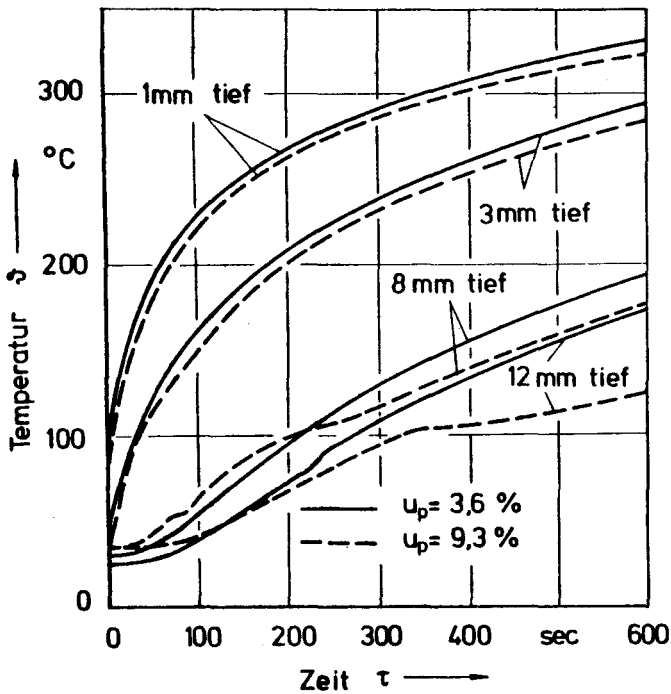


Abb. 5.1: Temperaturverteilungen bei 410 °C Ofentemperatur in Abhängigkeit von Zeit und Feuchtigkeit

peraturprofile, die in Tabelle 5.1 dargestellt sind, den Schluß zu, daß sie nicht allein die Ursache für die differierende Ausbildung der Temperaturfelder bei den beiden verwendeten Feuchtigkeiten sein können. Dazu liegen sie zu dicht beieinander.

So läßt sich aus den Versuchsergebnissen ein spürbarer Feuchtigkeits-einfluß ablesen.

Die Versuche bei schwächerer Beheizung mit 410 °C Ofentemperatur (Abb. 5.1) zeigen im oberflächennahen Bereich, d.h. in 1 mm und 3 mm Tiefe, gleichmäßige Abweichungen, die vom Versuchsbeginn an unverändert bleiben und von der Feuchtigkeit offensichtlich kaum beeinflusst sind. das ist auf eine schnelle Entfeuchtung im Randbereich zurückzu-

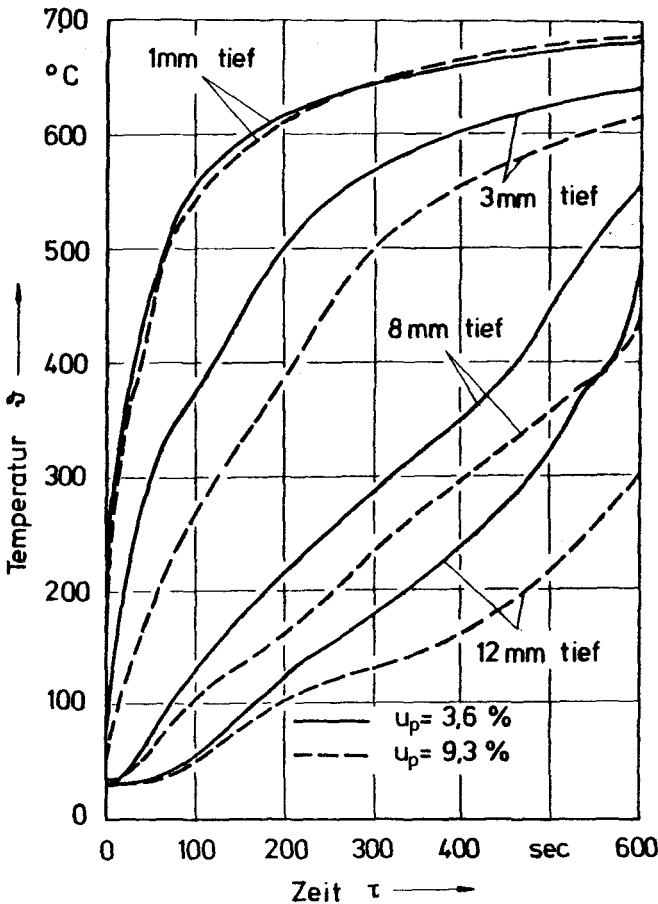


Abb. 5.2: Temperaturverteilungen bei 708 °C Ofentemperatur in Abhängigkeit von Zeit und Feuchtigkeit

führen, die zum Teil schon in der Vorkammer stattgefunden haben kann. Danach liegen in diesem Bereich ähnliche Stoffeigenschaften vor, die sich bei der Aufheizung demnach auch annähernd gleich verhalten müssen.

In den tieferen Zonen in 8 mm und 12 mm Meßtiefe, die wegen der schlechten Wärmeleitfähigkeit des Holzes wesentlich langsamer aufgeheizt werden, liegen nach verzögertem Aufheizvorgang um 100 °C Wendepunkte

bei 104 °C für 3.6 % Feuchtigkeit und 108 °C für 9.3 % Feuchtigkeit vor, wobei die Verzögerung in den Verläufen der feuchteren Probe deutlich größer ist. Daraus ist zu entnehmen, daß der Desorptions- und der Verdampfungsprozeß diesen Effekt bewirkt haben. Mögliche endotherme Zersetzungsreaktionen, wie sie von Heinrich und Kaesche-Krischer /35/ in diesem Temperaturbereich vermutet wurden, finden in diesen Ergebnissen keine Bestätigung.

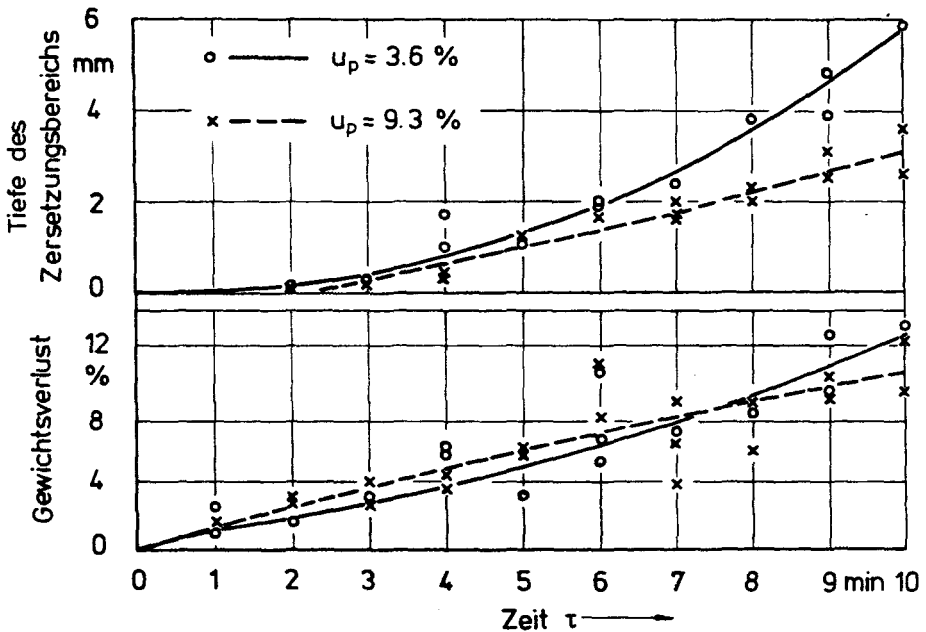


Abb. 5.3: Gewichtsverlust und Tiefe des Zersetzungsbereichs für 410 °C Ofentemperatur in Abhängigkeit von Zeit und Feuchtigkeit

Abb. 5.3 zeigt den Einfluß von thermischer Zersetzung und Entfeuchtung auf den Gewichtsverlust auf. Während zu Beginn des Aufheizprozesses nur geringfügige Zersetzungserscheinungen zu beobachten sind, wie aus der zeitlichen Änderung des visuellen Zersetzungsbereichs zu entnehmen ist, liegt der Gewichtsverlust bei größerer Feuchtigkeit über dem der trockeneren Probe, da er hauptsächlich aus der Verdampfung des einge-

bundenen Wassers resultiert. Er wird jedoch mit zunehmender Versuchszeit durch die beginnende Zersetzung, die bei geringerer Feuchtigkeit früher einsetzt, kompensiert, so daß schließlich gegen Ende der Versuchszeit der Gewichtsverlust stärker von der Pyrolyse als von der Verdampfung beeinflußt wird.

Da die Proben, die bei diesen Versuchsbedingungen verwendet wurden, über die gesamte Versuchszeit in der äußeren Form unverändert blieben und eine gleichmäßige Zersetzungszone aufwiesen, können für die dargestellten Ergebnisse für 410 °C Ofentemperatur annähernd eindimensionale Bedingungen zugrundegelegt werden.

Bei der stärkeren Beheizung, die bei 708 °C durchgeführt wurde, konnten diese Bedingungen nicht aufrechterhalten werden, da bereits nach sieben Minuten eine deutliche Verformung der Proben zu beobachten war. Sie führte zu einer verstärkten Beheizung der Ränder, wodurch die Proben seitlich zum Platzen gebracht wurden und die Wasserglashaut aufgerissen wurde. Diese Veränderungen führten zu so starken Abweichungen der Erwärmungsverhältnisse von eindimensionalen Bedingungen, daß bei der Bewertung der Ergebnisse nur die ersten sieben Minuten berücksichtigt werden.

Die Darstellung der zeitlichen Änderung der örtlichen Temperaturen in Abb. 5.2 zeigt auch hier im Randbereich ein von der Feuchtigkeit kaum beeinflusstes Verhalten und weist in 8 mm und 12 mm Meßtiefe die für die Entfeuchtung typischen Wendepunkte auf. Diese liegen jedoch höher als bei der schwachen Beheizung und zwar bei 128 °C für 9.3 % Feuchtigkeit und bei 138 °C für 3.6 % Feuchtigkeit, wobei die Messung in 12 mm Tiefe betrachtet wird. Wegen der sichtbaren Abhängigkeit vom Feuchtigkeitsgehalt wird davon ausgegangen, daß bis zu diesen Temperaturen jeweils der Verdampfungsvorgang stattfindet. Da die Erhöhung der Siedetemperatur durch einen Druckanstieg erfolgt, müssen im Porenraum Drücke von 2.5 bzw. 3.5 bar herrschen, die durch den in die Hohlräume des Körpers eintretenden Dampf hervorgerufen werden. Dieser Vorgang ist nicht nur von der Transportrichtung, sondern auch von Aufheizgeschwindigkeit und Feuchtigkeit abhängig.

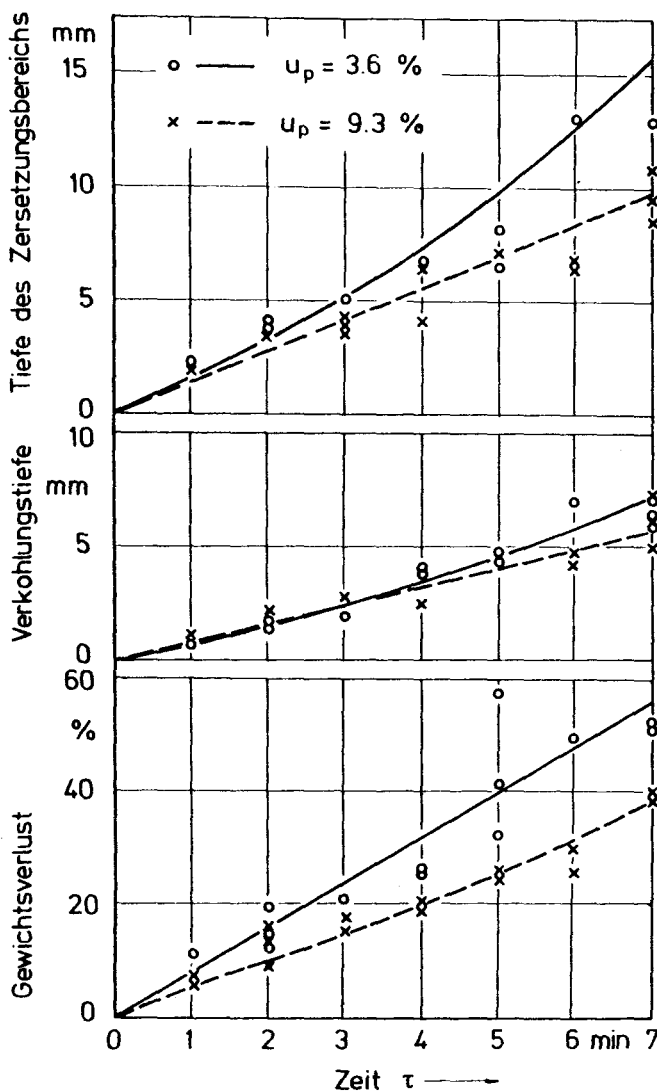


Abb. 5.4: Gewichtsverlust und Tiefe von Zersetzungs- und Verkohlungsbereich für 708 °C Ofentemperatur in Abhängigkeit von Zeit und Feuchtigkeit

Aus diesen Überlegungen lassen sich die explosionsartigen Erscheinungen erklären, die Brown /8/ bei der Beheizung von Frischholz beobachtet hat.

Der Einfluß der Pyrolyse auf den Temperaturverlauf wird durch die Messung in 3 mm Tiefe deutlich. Hier zeigen sich die in der Literatur bereits häufig beschriebenen Wendepunkte im Temperaturbereich zwischen 350 °C und 400 °C, die jedoch von den einzelnen Autoren zum Teil unterschiedlich interpretiert werden (s. Kap. 2.1.2). Auf Grund der bekannten DTA-Untersuchungen ist zu vermuten, daß dieser Effekt durch einen exothermen Zersetzungsprozeß bewirkt wird.

Der Einfluß der Feuchtigkeit auf den Verlauf von Zersetzung und Verkohlung, der aus Abb. 5.4 hervorgeht, ist zu Beginn der Versuche nur geringfügig. Mit zunehmender Versuchszeit ergibt sich eine Verzögerung des Zersetzungsgeschehens bei der feuchteren Probe, die einen verzögerten Verlauf des Gewichtsverlustes bewirkt. Nach fünf Minuten zeigt sich eine deutliche Zunahme der Tiefe des Zersetzungsbereichs bei der trockneren Probe, die auf die Gefügeänderungen zurückzuführen ist, die während der Versuche an den Seiten der Holzkörper zu beobachten waren und mit zunehmender Feuchtigkeit später auftraten.

Insgesamt zeigen die dargestellten Meßergebnisse den Einfluß der Feuchtigkeit deutlich auf, wenn sie auch Fehlern unterworfen sein mögen, die aus den Meßgenauigkeiten und den nicht exakt bestimmbareren Meßorten resultieren können. Da jedoch tendenzielle Aussagen ausreichend sind und die einzelnen verwendeten Proben naturgemäß weder im Feuchtigkeitsprofil, noch in der Struktur vollkommen gleich sein können, sind die Meßergebnisse für den Vergleich mit dem mathematischen Modell ausreichend.

5.2 Vergleich der Messungen mit dem mathematischen Modell

Der Vergleich der Meßergebnisse mit den Ergebnissen des mathematischen Modells verfolgt zwei Ziele, die Ermittlung der Güte der mathematischen Beschreibung der physikalischen Vorgänge und die Anpassung der Stoffwerte und der reaktionskinetischen Parameter. Beides wird auf

dem gleichen Weg über Parameterstudien erreicht, wobei von den aus der Literatur bekannten Erkenntnissen (s. Kap. 2) und den Vorstellungen ausgegangen wird, die sich auf Grund der eigenen Messungen ergeben. Außerdem wird berücksichtigt, daß die beiden verwendeten Aufheizbedingungen zu unterschiedlichen Verhaltensweisen der einzelnen Prozesse führen können. So ergeben sich aus den Parameterstudien die Datensätze, die in Tabelle 5.2 dargestellt sind und mit denen die gemessenen Vorgänge beschrieben werden.

$\vartheta_U/^{\circ}\text{C}$	708	410
$\lambda_H/(\text{kJm}^{-1}\text{s}^{-1}\text{K}^{-1})$	$f(\vartheta, u)$, s. Kap.3.2.5.3	$f(\vartheta, u)$, s. Kap.3.2.5.3
$\lambda_C/(\text{kJm}^{-1}\text{s}^{-1}\text{K}^{-1})$	1.105×10^{-4}	1.768×10^{-4}
$c_H/(\text{kJkg}^{-1}\text{K}^{-1})$	$f(\vartheta, u)$, s. Kap.3.2.5.2	$f(\vartheta, u)$, s. Kap.3.2.5.2
$c_C/(\text{kJkg}^{-1}\text{K}^{-1})$	$f(\vartheta)$, nach /101/	$f(\vartheta)$, nach /101/
κ_H/darcy	10^{-4}	10^{-4}
κ_C/darcy	10^{-2}	10^{-2}
$q_Z/(\text{kJkg}^{-1})$	300	300
$E/(\text{kJkmol}^{-1})$	190 000	190 000
k_O/s^{-1}	1.1×10^{14}	1.1×10^{14}
n	1.7	1.7

Tabelle 5.2: Zusammenstellung der in den Vergleichsrechnungen verwendeten Stoffeigenschaften und reaktionskinetischen Parameter in Abhängigkeit von der Ofentemperatur

Bei den vorliegenden Berechnungen sind außerdem die Anfangstemperaturprofile, die sich aus der in Kap. 5.1 beschriebenen Vorheizung ergeben haben, zu berücksichtigen. Sie werden mit dem mathematischen Modell nachgerechnet und zusammen mit den dazugehörigen weiteren Größen als Anfangsverteilungen eingegeben (s. Abb. 3.14). Die verwendeten Eingabefelder sind in den Tabellen im Anhang (Kap. 8) zu finden.

Der Vergleich läßt sich in zwei Richtungen aufteilen, die jeweils durch charakteristische Größen beeinflusst werden. Dabei wird der thermische Bereich vor allem durch den Wärmeübergang, die thermischen Stoffeigenschaften, die innere Konvektion und die Reaktionsenthalpie bestimmt, während die Pyrolyse durch die reaktionskinetischen Größen beeinflusst wird. Diese Aufteilung weist bereits auf die gegenseitige

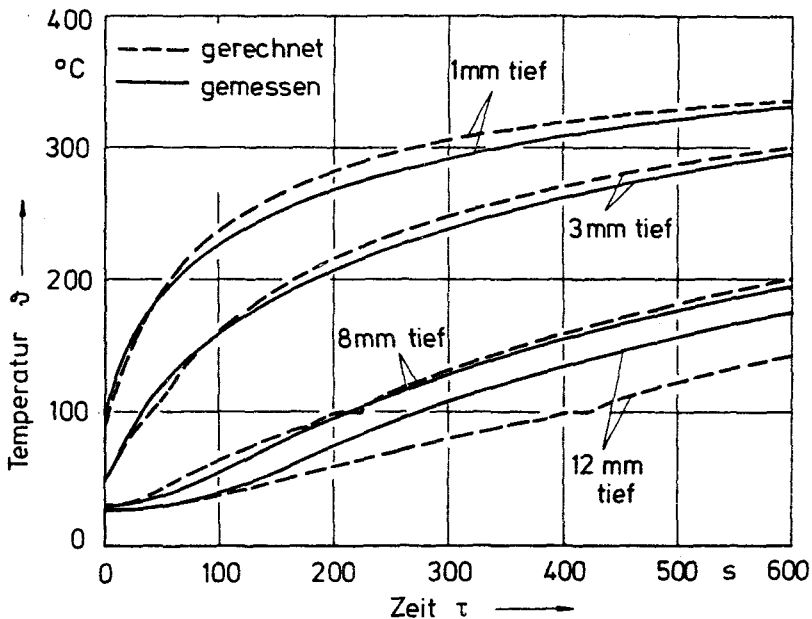


Abb. 5.5: Vergleich der Temperaturen aus Messung und Rechnung für 410 $^{\circ}\text{C}$ Ofentemperatur und 3.6 Gew.-% Feuchtigkeit

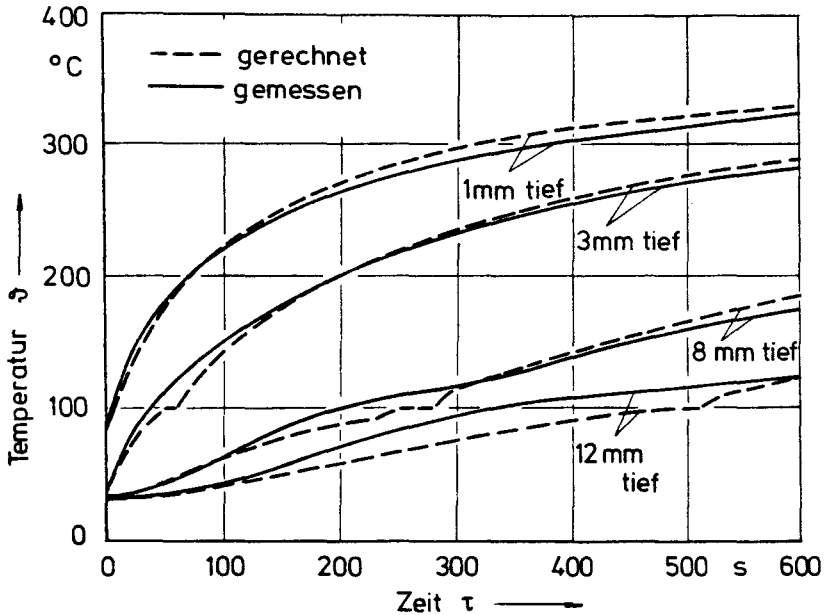


Abb. 5.6: Vergleich der Temperaturen aus Messung und Rechnung für 410 $^{\circ}\text{C}$ Ofentemperatur und 9.3 Gew.-% Feuchtigkeit

Einflußnahme hin, wobei die Berechnungen gezeigt haben, daß das thermische Verhalten des Modells nur geringfügig auf unterschiedliche reaktionskinetische Daten reagiert hat. Diese wiederum scheinen im betrachteten Temperaturbereich unabhängig von den Wärmeübergangsbedingungen zu sein, wie aus Tabelle 5.2 ersichtlich ist.

Die Güte der Beschreibung des thermischen Verhaltens ergibt sich aus dem Vergleich der berechneten und gemessenen Temperaturverläufe.

Dabei zeigen die Abb. 5.5 und 5.6 sehr gute Übereinstimmungen für die Ergebnisse mit der schwächeren Beheizung bei 410 $^{\circ}\text{C}$ Ofentemperatur. Aus diesem Grund kann der gemessene Verlauf für 12 mm Tiefe bei 3.6 Gew.-% Feuchtigkeit als Meßergebnis eines Ortes zwischen 8 mm und 12 mm interpretiert werden.

Der Verdampfungsvorgang wirkt sich wegen der konstanten Siedetemperatur von 100°C auf die berechneten Temperaturverläufe stärker aus, da mit zunehmender Feuchtigkeit ausgeprägtere Haltebereiche entstehen. Aus diesem Grund liegen die Temperaturen bis zur Verdampfung im allgemeinen etwas unterhalb des gemessenen Verlaufs, der wegen der Druck- und der damit verbundenen Siedetemperaturerhöhung eine über 100°C hinausgehende Abflachung erfährt.

Schwieriger ist die Erfassung der Vorgänge in der Probe bei höheren Aufheizgeschwindigkeiten (708°C Ofentemperatur). Hier ist neben Aufheizung, Verdampfung und leichter Zersetzung, die auch bereits bei 410°C Ofentemperatur auftreten, die thermische Zersetzung bis zur Verkohlung zu berücksichtigen. Wegen des geringen Kenntnisstandes auf diesem Gebiet kann zumindest ihr Einfluß auf das Temperaturverhalten tendenzmäßig nicht einwandfrei erfaßt werden, wie die Abb. 5.7 und 5.8 zeigen.

In der Randzone ergeben sich nach etwa 80 s höhere gemessene Temperaturen, die durch Strukturänderungen wie z.B. Risse und Veränderungen der Oberflächenabstände durch Verkohlung entstanden sein können. Diese Effekte werden in dem mathematischen Modell nicht berücksichtigt.

Der in 3 mm Tiefe gemessene Temperaturverlauf weist deutliche Wendepunkte im Bereich zwischen 350°C und 400°C auf, die in der Rechnung nicht nachvollzogen werden. Hier finden offensichtlich Vorgänge statt, die von dem mathematischen Modell nicht beschrieben werden. Eine Verbesserung der Ergebnisse ließe sich vermutlich nur über weitere Untersuchungen zum Ablauf der Pyrolyse und die damit verbundene Änderung der Stoffwerte erreichen.

Die Beschreibung der Vorgänge in den tieferen Zonen ist, wie bereits an den Ergebnissen für die schwächere Beheizung zu erkennen war, gut.

Während die Auswirkungen des Zersetzungsgeschehens auf die Temperaturen zum Teil abweichend von den realen Vorgängen beschrieben werden, zeigen die zeitlichen Änderungen von Zersetzungs- und Verkoh-

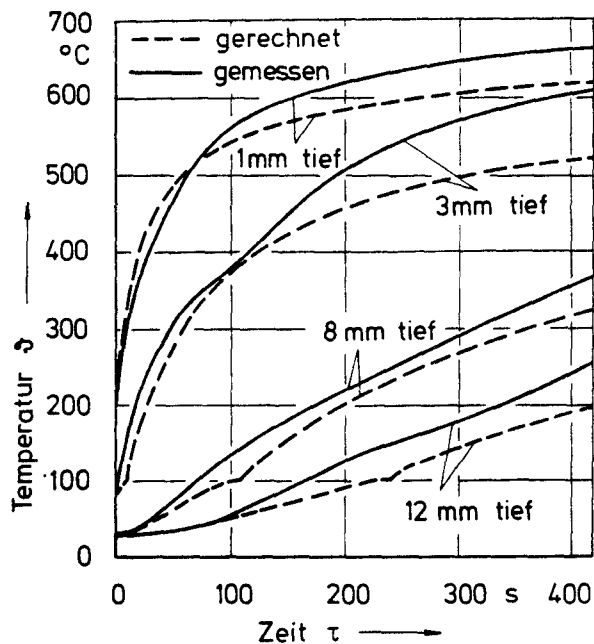


Abb. 5.7: Vergleich der Temperaturen aus Messung und Rechnung für 708 °C Ofentemperatur und 3.6 Gew.-% Feuchtigkeit

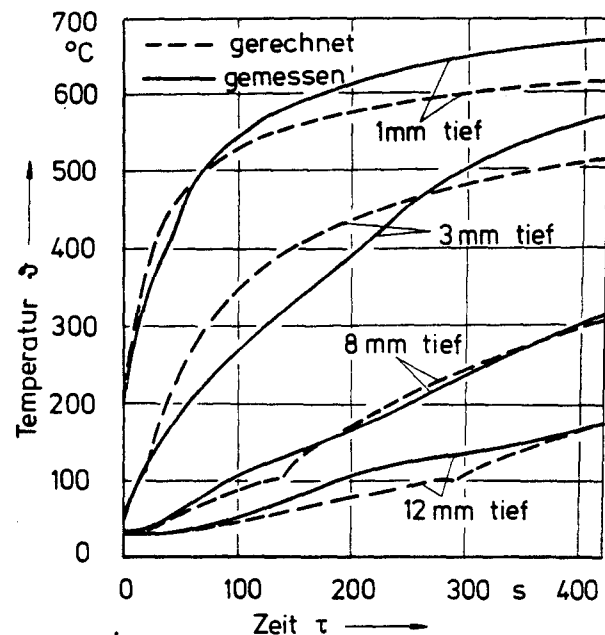


Abb. 5.8: Vergleich der Temperaturen aus Messung und Rechnung für 708 °C Ofentemperatur und 9.3 Gew.-% Feuchtigkeit

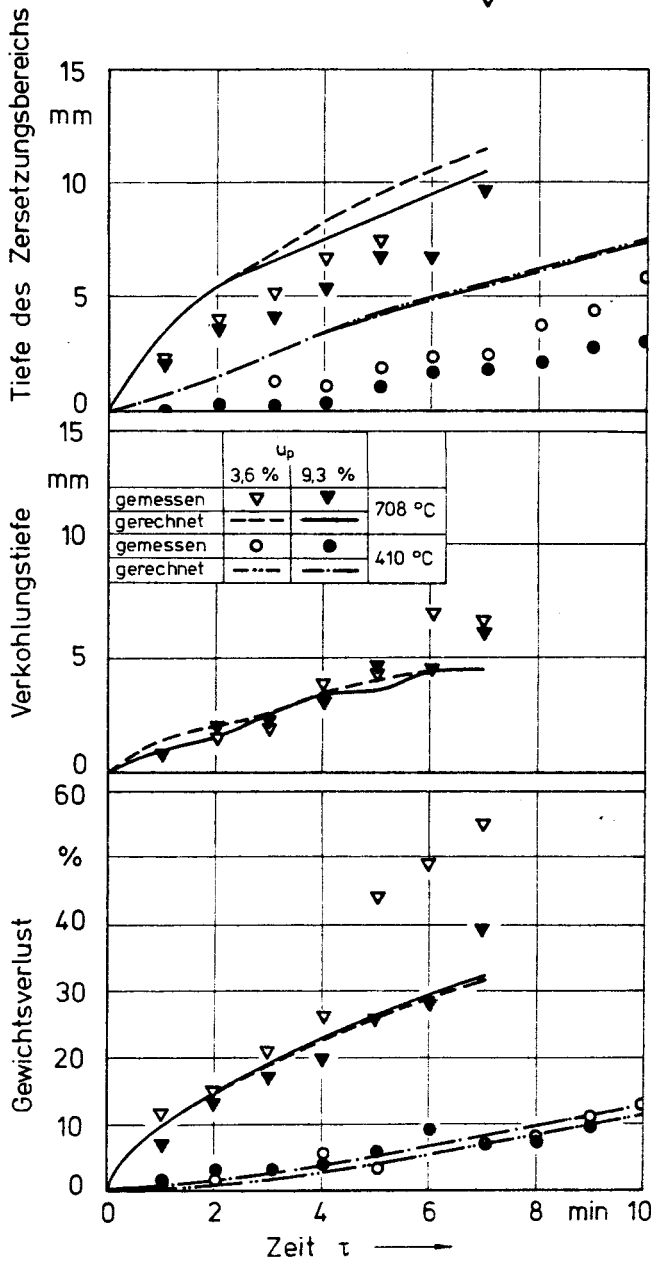


Abb. 5.9: Vergleich der Tiefen von Zersetzungs- und Verkohlungszone sowie der Gewichtsverluste für alle Versuchsbedingungen

lungzone sowie des Gewichtsverlustes bis zum Einsetzen veränderter Beheizungsbedingungen, die bei 708°C Ofentemperatur aufgetreten sind, eine gute Übereinstimmung mit der Messung. Die vergleichende Darstellung in Abb. 5.9 zeigt weiterhin Unterschiede im Zersetzungsverlauf, die die Diskrepanz zwischen realer und visuell erfassbarer Zersetzungstiefe wiedergibt, wenn davon ausgegangen wird, daß die Rechnung tendenziell richtig liegt. Diese Auffassung wird durch den Vergleich der Verkohlungstiefen für die stärkere Beheizung unterstützt.

Der Vergleich zwischen den gemessenen und berechneten Ergebnissen zeigt, daß das mathematische Modell die gemessenen Vorgänge überwiegend gut beschreibt, so daß weitere Studien zum Feuchtigkeitseinfluß auf die bei Beheizung im Holzkörper ablaufenden Prozesse als sinnvoll erachtet werden können.

5.3 Studium des Feuchtigkeitseinflusses mit dem mathematischen Modell

Bei den weiteren Betrachtungen zum Einfluß der Feuchtigkeit auf das thermische Verhalten von Holz werden sowohl die Ofentemperaturen mit 700°C und 400°C , als auch die Stickstoffatmosphäre um den Körper beibehalten. Da gezeigt werden soll, welche Unterschiede im Systemverhalten bei unterschiedlich feuchten Körpern auftreten können, werden zwei Zustände studiert, ideal trockenes Holz ohne Feuchtigkeit und trocken gelagertes Holz mit 10 Gew.-% Feuchtigkeit.

Einige Tendenzen wurden bereits in den Kap. 5.1 und 5.2 besprochen und sollen hier weiter vertieft werden. So enthält Abb. 5.10 die berechneten Temperaturfelder für 700°C Umgebungstemperatur. Die dabei übertragene Wärmestromdichte nimmt während der Prozeßzeit von 56 auf $47\text{ kJ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ in Abhängigkeit von der Oberflächentemperatur ab. Diese Berechnung vertieft die bereits gewonnene Erkenntnis, daß der Randbereich bei dieser Beheizung in seinem Aufheizverhalten von der hygroskopisch gebundenen Feuchtigkeit fast unbeeinflusst bleibt.

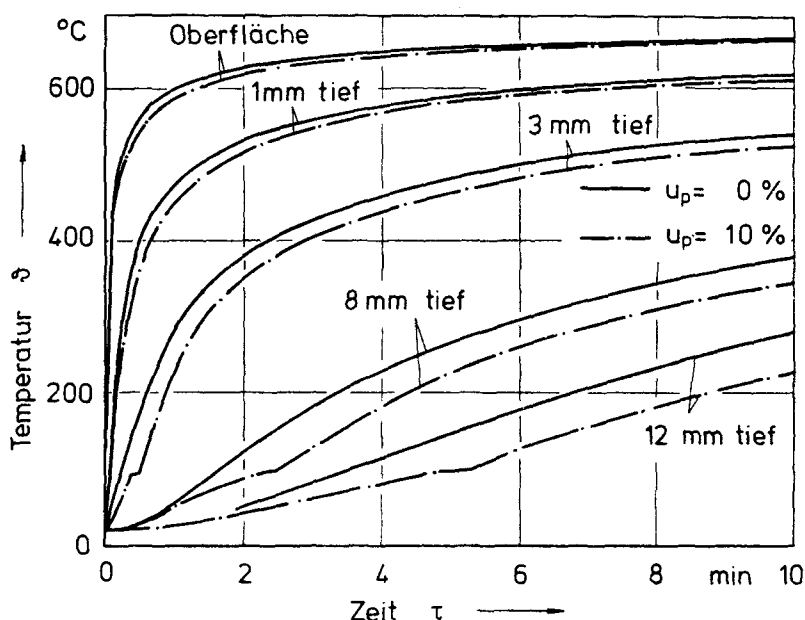


Abb. 5.10: Berechnete Temperaturfelder für 700°C Umgebungstemperatur bei 0 und 10 Gew.-% Feuchtigkeit

Auch sonst bleibt die bereits aufgezeigte Tendenz erhalten, daß die Feuchtigkeit mit zunehmender Tiefe an Einfluß gewinnt.

Die Aussage über das Oberflächentemperaturverhalten kann für die Berechnungen bei 400°C Umgebungstemperatur, bei der Wärmestromdichten von 16.5 bis $15.8 \text{ kJ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ übertragen werden, nicht in der gleichen Deutlichkeit aufrechterhalten werden. Die in Abb. 5.11 dargestellten Temperaturen zeigen im Randbereich größere Abweichungen, die gleichfalls mit dem Abstand von der Oberfläche zunehmen.

Aus dem Vergleich der Oberflächentemperaturen ist zu schließen, daß der Einfluß von Feuchtigkeiten dieser Größenordnung mit zunehmender Beheizung abnimmt und somit für brandtechnische Überlegungen an Be-

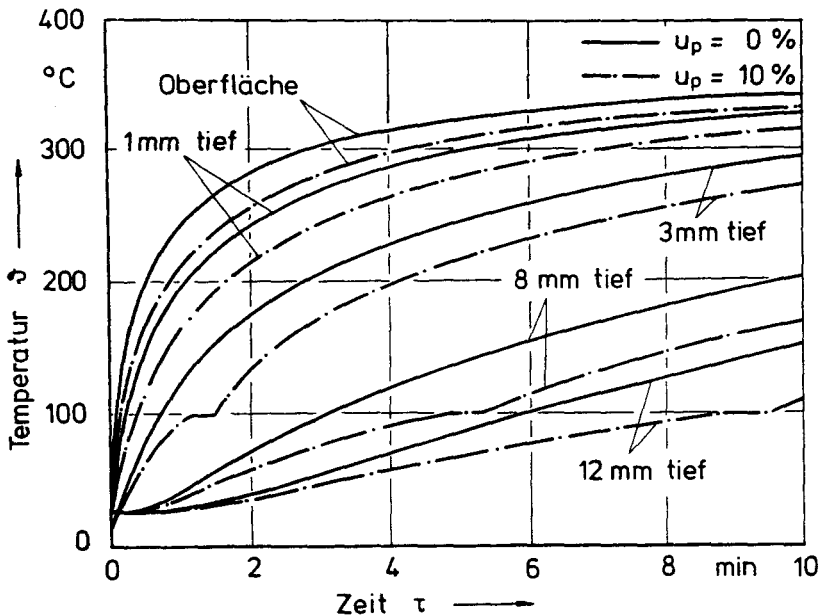


Abb. 5.11: Berechnete Temperaturfelder für 400 $^{\circ}\text{C}$ Umgebungstemperatur bei 0 und 10 Gew.-% Feuchtigkeit

deutung verliert. In diesem Zusammenhang sind die Voraussetzungen für Zündvorgänge interessant, die im Falle von Selbstentflammung einerseits von der Oberflächentemperatur und andererseits vom Umfang der aus der Oberfläche austretenden Zersetzungsgase abhängen. Dazu ergibt sich aus Abb. 5.9, daß die Pyrolyse zu Beginn der Beheizung von der Feuchtigkeit nicht beeinflußt wird, da die Trocknung des Randbereichs wegen der anfänglich kurzen Transportwege für die Wärme schneller erfolgt als im Innern des Körpers. Dieser Effekt läßt sich auch an der zeitlichen Änderung der Tiefe der Verdampfungsfront in Abb. 5.12 ablesen, die zu Beginn auf eine erhöhte Verdampfungsgeschwindigkeit hinweist. Wird weiterhin berücksichtigt, daß bei beiden Aufheizbedingungen die Trocknung der Randzone sehr schnell erfolgt, so ergibt sich für die Zündwilligkeit eines Holz-

Körpers unter Brandbedingungen, die ausschließlich von den Prozessen im Randbereich abhängig ist, daß die hygroskopisch gebundene Feuchtigkeit ohne erkennbaren Einfluß bleiben muß. Erst die weitere Erwärmung erfährt durch die Trocknungsvorgänge im Körperinneren Verzögerungen, die von der übertragenen Wärmestromdichte und der Feuchtigkeit abhängen (Abb. 5.12). Dabei verhält sich die Verdampfungsgeschwindigkeit zu Beginn progressiv und wird nach etwa zwei Minuten konstant.

Neben der Ausbildung der Temperaturfelder im Körper wird das Strömungsverhalten des eingeschlossenen Gases, das sich aus Luft, Wasserdampf und Zersetzungsprodukten zusammensetzt, von der Feuchtigkeit beeinflusst. Dazu werden im vorliegenden Fall die Ergebnisse aus den

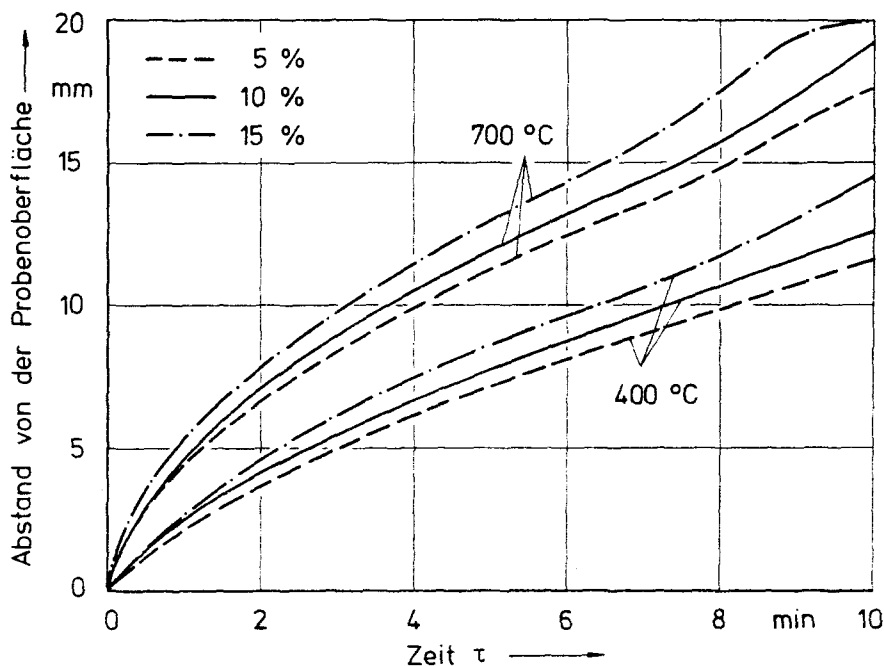


Abb. 5.12: Veränderung der Tiefe der Verdampfungsfrent in Abhängigkeit von Umgebungstemperatur, Feuchtigkeit und Zeit

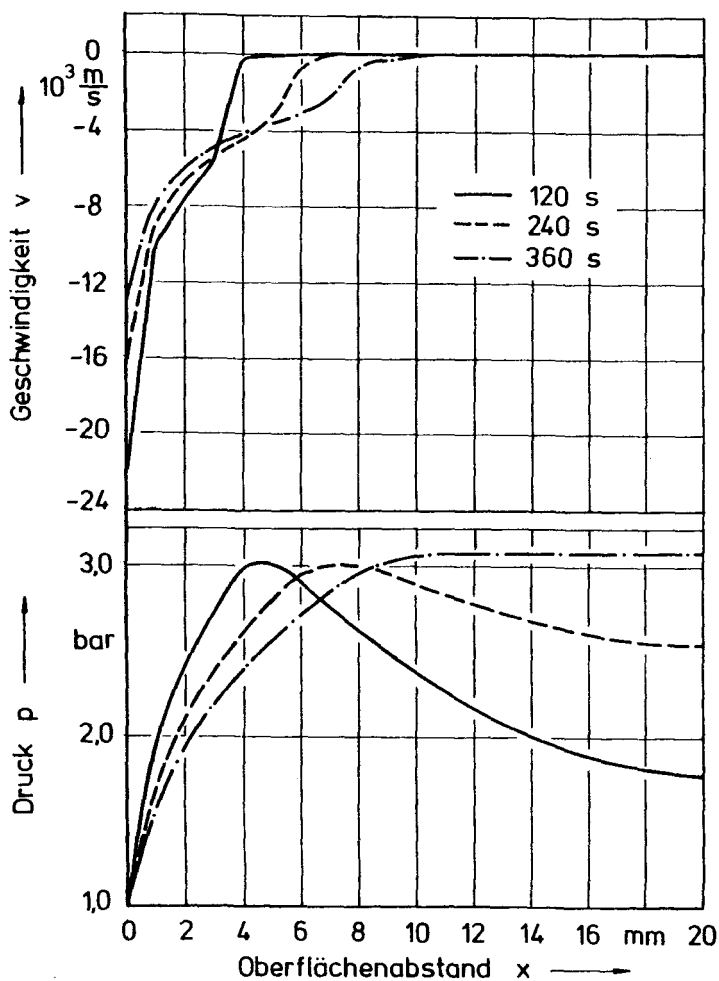


Abb. 5.13: Geschwindigkeits- und Druckverteilungen bei 700 °C Umgebungstemperatur und trockenem Zustand

Berechnungen mit 700 °C Umgebungstemperatur verwendet, da sie die Pyrolyse bis zur Verkohlung enthalten.

Abb. 5.13 enthält zeitabhängig die örtlichen Geschwindigkeits- und

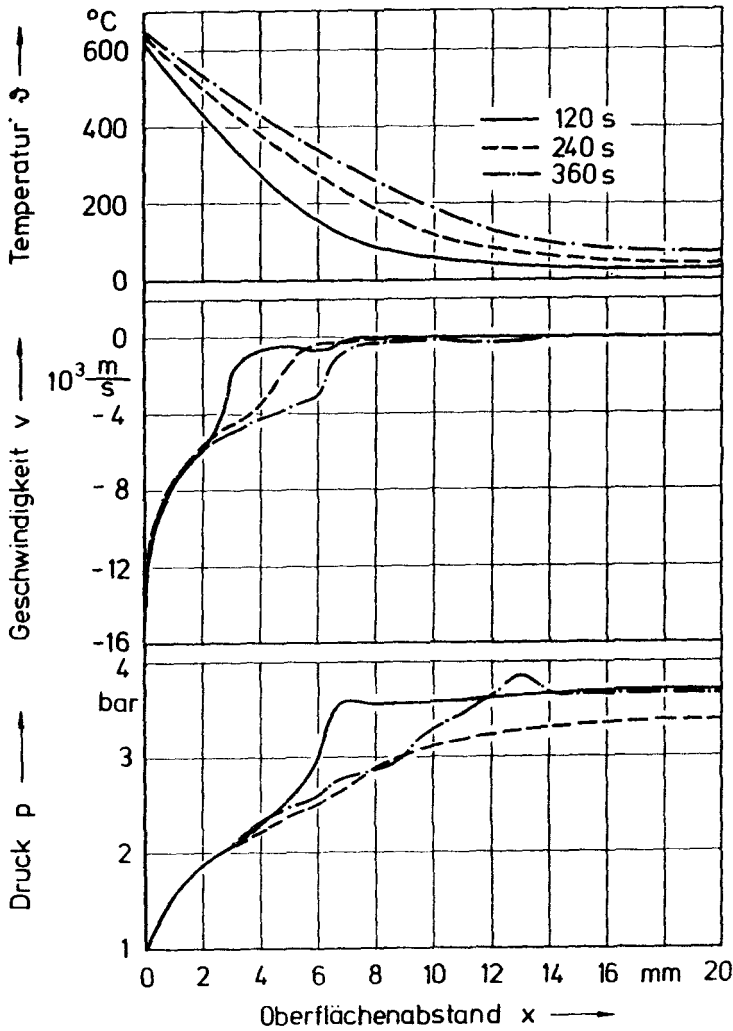


Abb. 5.14: Örtliche Temperatur-, Geschwindigkeits- und Druckverteilungen bei 700 °C Umgebungstemperatur in einem Körper mit 10 Gew.-% Feuchtigkeit

Druckverteilungen für einen trockenen Körper unter der Voraussetzung des in Tabelle 5.2 zusammengefaßten Datensatzes. Daraus ergeben sich Drücke, die im unmittelbaren Zersetzungsgebiet bei etwa 3 bar liegen und somit deutlich von den von Lee u.a. /63/ bis 1.31 bar gemessenen Drücken abweichen. Der Unterschied kann einerseits in der örtlichen Störung des Gefüges durch die Meßsonde und Risse und andererseits durch unterschiedliche Permeabilitäten entstanden sein. Kansa u.a. /42/ haben mit ähnlichen Permeabilitäten wie sie in diesem Datensatz verwendet werden, die Ergebnisse von Lee u.a. nachvollzogen, wobei sie jedoch eine sehr kleine Wärmeleitfähigkeit für die Holzkohle verwendeten, die eine starke Verzögerung von Erwärmung und Zersetzung bewirkt.

Die Geschwindigkeiten sind bei einem trockenen Körper an der Oberfläche größer als bei einer Probe mit 10 Gew.-% Feuchtigkeit, deren Geschwindigkeitsprofil aus Abb. 5.14 hervorgeht. Das ist auf die durch Feuchtigkeit bewirkte Verzögerung des Zersetzungs Vorganges zurückzuführen, durch den insgesamt wesentlich mehr Gas dem Porenraum zugeführt wird als durch den Verdampfungsprozeß. Im Bereich der Trocknung entstehen örtliche Druckspitzen, die nach 120 s bei 7 mm und nach 360 s bei 13mm liegen. Das Fehlen eines solchen Merkmals im Verlauf für 240 s ist auf die Diskretisierung im mathematischen Modell zurückzuführen, durch die die Verdampfung stufenweise berechnet wird. Die Schwingungen in den Druck- und Geschwindigkeitsverläufen ergeben sich aus der Überlagerung der Gasströme aus Zersetzung und Verdampfung. Es zeigt sich bei diesen Ergebnissen, daß die berechneten Drücke mit Spitzen über 3.5 bar der Größenordnung entsprechen, die bereits bei den Meßergebnissen vermutet wurde. So ist anzunehmen, daß auch die Ergebnisse für den trockenen Körper der Realität nahekommen.

Das örtliche Temperaturprofil weist bei feuchten Stoffen um 100 °C einen leichten Knick auf, der den Ort der Trocknung kennzeichnet.

Durch veränderte Permeabilitäten, die bei unterschiedlichen Holzstrukturen oder beim Transport längs der Faser vorliegen können, verändern sich die Verhältnisse im Körper. Das Geschwindigkeitsprofil wird bei

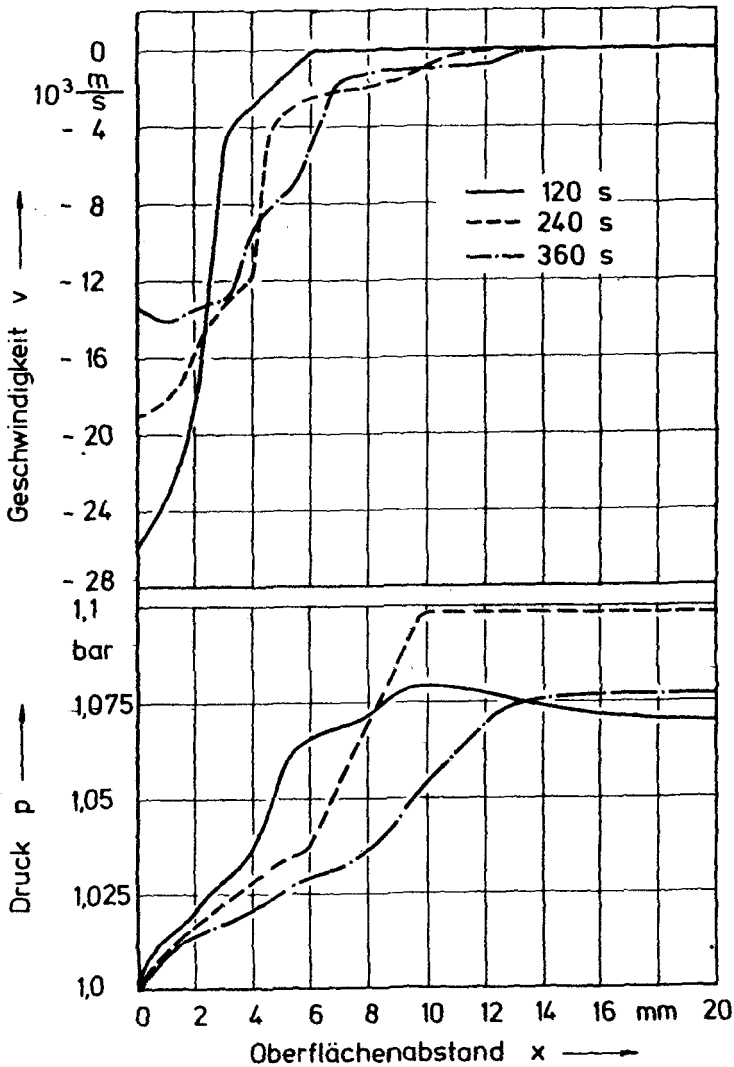


Abb. 5.15: Geschwindigkeits- und Druckverteilungen bei 700 °C Umgebungstemperatur in einem Körper mit 10 Gew.-% Feuchtigkeit und veränderten Permeabilitäten ($\kappa_H = 10^{-2}$ darcy; $\kappa_C = 1$ darcy)

größeren Gasdurchlässigkeiten breiter, und der Druck nimmt im Porenraum ab. Abb. 5.15 zeigt diese Abhängigkeiten auf, wobei die Beträge für die Permeabilitäten aus Tabelle 5.2 mit dem Faktor 100 multipliziert werden. Diese Verringerung der Transportwiderstände, die im Vergleich zur Literatur immer noch sehr kleine Werte ergibt, bewirkt eine Reduktion der Drücke auf Werte unter 1.1 bar. Daraus ist zu sehen, daß Störungen des Gefüges bereits zu erheblichen Änderungen im Ergebnis führen können.

Aus der Studie über das Strömungsverhalten im beheizten Körper läßt sich ableiten, daß für die Gasführung bei den vorgegebenen Randbedingungen ausnahmslos die Eigenschaften des Körpers zwischen der exponierten Oberfläche und dem Quellort verantwortlich sind. Diese von Kansa u.a. /42/ verwendete Vereinfachung wird durch diese Ergebnisse gestützt.

Zusammenfassend ist festzustellen, daß die hygroskopisch gebundene Feuchtigkeit bei einer Transportrichtung quer zur Faser bei Trocknung Druckspitzen bewirkt, die zu Gefügeänderungen und somit zum Abbau von Strömungswiderständen und Wärmetransportbrücken führt. So lassen sich Stoffwerte, die mit vorsichtig vorgetrockneten Hölzern ermittelt wurden, offensichtlich nicht einfach auf feuchte, bei hoher Aufheizgeschwindigkeit getrocknete Stoffe übertragen. Daraus könnten teilweise die Unterschiede zwischen den gemessenen Werten von Brown /7/ und den bei diesen Berechnungen verwendeten Werten erklärt werden.

Es ist jedoch generell festzustellen, daß für hohe, den Brandschutz interessierende Aufheizgeschwindigkeiten Stoffwerte für den Zustand unmittelbar vor, während und nach der thermischen Zersetzung fehlen bzw. als nicht ausreichend gesichert angesehen werden müssen. So sind die Berechnungen unter dem Eindruck dieser Mängel zu bewerten.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Ziel der vorliegenden Arbeit war die Untersuchung des Einflusses hygroskopisch gebundener Feuchtigkeit in trocken gelagerten Hölzern auf die Prozesse im Körperinneren bei Erwärmung in höheren Umgebungstemperaturen. Damit sollte ermittelt werden, ob Feuchtigkeitsgehalte der Größenordnung zwischen 0 und 15 Gew.-% in brandtechnische Überlegungen einbezogen werden müssen.

Es wurde ein mathematisch - physikalisches Modell entwickelt, das den Wärme- und Stofftransport in einem Holzkörper bei Beheizung durch Strahlung und freie Konvektion beschreibt. Das betrachtete System umfaßt die feste Zellwand mit dem sorptiv eingebundenen Wasser und das im Porenraum vorhandene Gas, das bei Auftreten von Druckgradienten an der Zellwand vorbeiströmt. Diese Gradienten können bei der Aufheizung durch Veränderung der Temperaturverteilung und durch örtliche Quellen, die durch Verdampfung und Pyrolyse entstehen, gebildet werden. Der Gasstrom ist dabei von den Transportwiderständen abhängig, die sich durch die Lage der Faser zur Transportrichtung und durch die Porosität ergeben, wobei die Beschreibung dieser Einflüsse über das Gesetz von Darcy erfolgt. Dabei ergeben sich so kleine Strömungsgeschwindigkeiten, daß die einzelnen Komponenten im Körper als im thermischen Gleichgewicht stehend angesehen werden können und mit einer gemeinsamen Energiebilanz erfaßt werden.

Die auftretenden temperaturabhängigen Umwandlungsvorgänge werden über Quellterme in den Bilanzen berücksichtigt.

Dieses nichtlineare Differentialgleichungssystem beschreibt abweichend von den bisher bekannten Modellen den Feuchtigkeitseinfluß auf das Aufheiz- und Zersetzungsverhalten von Holz unter Berücksichtigung der Temperatur- und Feuchtigkeitsabhängigkeit der Stoffwerte. Es wurde numerisch nach der Methode von Crank und Nicolson für eindimensionalen Transport gelöst, wobei das erforderliche Rechenprogramm in der Programmiersprache Basic erstellt und auf einem kleinen Prozeßrechner bearbeitet wurde.

Die Aussagefähigkeit dieses Modells wurde an Hand von experimentellen Ergebnissen aus Untersuchungen an Fichtenholzkörpern mit Feuchtigkeitsgehalten von 3.6 und 9.3 Gew.-% in inerter Atmosphäre geprüft. Die Probenkörper, die in einem elektrischen Laborofen bei 410 °C und 708 °C Ofentemperatur beheizt wurden, waren so gedämmt, daß die Wärme nur über eine exponierte Fläche in den Körper eindringen konnte, womit annähernd eindimensionale Verhältnisse vorgegeben waren. Dabei wurden Temperaturen in verschiedenen Abständen von dieser Oberfläche kontinuierlich gemessen, während der auftretende Gewichtsverlust und die zeitliche Änderung von Verkohlungszone und visuell erfaßbarem Zersetzungsgebiet diskontinuierlich bis zu 10 Minuten in Stufen von einer Minute durchgeführt wurden.

Nach Anpassung der Stoffwerte und der reaktionskinetischen Parameter für die Rechnung zeigen die Ergebnisse, daß das mathematische Modell die auftretenden Vorgänge überwiegend gut wiedergibt.

Aus diesen Untersuchungen geht hervor, daß mit Zunahme der Aufheizgeschwindigkeit der Feuchtigkeitseinfluß im Randbereich auf den Temperaturverlauf und das Zersetzungsgeschehen, der ohnehin nicht sehr groß ist, abnimmt. Dagegen erfolgt im Inneren des Körpers mit zunehmendem Abstand von der Oberfläche eine deutliche Verzögerung des Erwärmungsvorganges, die von der Verdampfungsgeschwindigkeit und somit von Wärmeübergang und Feuchtigkeitsgehalt abhängig ist.

Das Strömungsverhalten des eingeschlossenen Gases, das vom thermischen Verhalten des Körpers beeinflußt wird, zeigt, daß mit zunehmender Feuchtigkeit Überlagerungen des Stromes der Zersetzungsgase und des Dampfes auftreten, die aus den leichten Schwingungen im Verlauf von Geschwindigkeit und Druck zu sehen sind. Dabei entstehen bei feuchten Stoffen örtlich Druckspitzen im Bereich der Verdampfung, die zu Veränderungen des Gefüges beitragen können. Ein Vergleich von Transportwiderständen, wie sie bei dem Transport parallel und senkrecht zur Faser auftreten können, zeigt in bezug auf die parallele Führung eine starke Abnahme des inneren Druckes.

Aus den Ergebnissen der vorliegenden Untersuchung kann geschlossen werden, daß die hygroskopisch gebundene Feuchtigkeit Zündvorgänge

bei höheren Umgebungstemperaturen kaum beeinflußt und so für brandtechnische Überlegungen unerheblich ist. Bei Betrachtung der Durchwärmung eines Holzkörpers ist sie jedoch zu berücksichtigen.

Weiterhin wurde die vielfach angenommene wärmedämmende Funktion der Holzkohlezone nicht bestätigt. Hier müssen weitergehende Untersuchungen durchgeführt werden, um zu gesicherten Ergebnissen zu gelangen.

Darüberhinaus wird deutlich, daß umfangreiche Untersuchungen über das Stoffverhalten bei höheren Aufheizgeschwindigkeiten erforderlich sind, um die Veränderungen unmittelbar vor, während und nach der thermischen Zersetzung in mathematischen Modellen zuverlässiger beschreiben zu können. Dabei ist es nicht ausreichend, sorgfältig vorgetrocknete Stoffe zu untersuchen, da Wärmestromdichten, wie sie im Brandfall auftreten, zu einer so scharfen Trocknung führen, daß bereits dadurch stoffliche Veränderungen auftreten, die die weiteren Prozesse beeinflussen können.

7. Literaturverzeichnis

- /1/ Bamford, C.H.; Crank, J.; Malan, D.H.: The Combustion of Wood. Proceedings of the Cambridge Philosophical Society, 42 (1946), S. 166-182
- /2/ Berezin, I.S.; Zhidkov, N.P.: Computing Methods, Vol. I. Pergamon Press 1965
- /3/ Bird, R.B.; Stuard, W.E.; Lightfoot, E.N.: Transport Phenomena. New York / London 1960
- /4/ Blackshear, P.L.; Kanury, A.M.: On the Combustion of Wood II : Combustion Science and Technology 2 (1970), S. 5-9
- /5/ Böhner, G.: Zur Wasserdampf - und Luftdurchlässigkeit verschiedener unbehandelter und thermisch behandelter Hölzer. Holz als Roh - und Werkstoff 34 (1976), S. 295-307
- /6/ Brötz, W.: Grundriß der chemischen Reaktionstechnik, Weinheim 1970
- /7/ Brown, L.E.: An Experimental and Analytical Study of Wood Pyrolysis. Dissertation, Norman / Oklahoma 1972
- /8/ Brown, M.: Persönliche Mitteilung veröffentlicht in /42/
- /9/ Cammerer, J.S.: Der Wärmeschutz von organischen Baustoffen unter den praktischen Verhältnissen Gesundheits - Ingenieur 59 (1936) 19, S. 261-268
- /10/ Cammerer, J.S.: Der Einfluß der Feuchtigkeit auf den Wärmeschutz von Bau - und Dämmstoffen nach dem internationalen Schrifttum. Wärme - und Kältetechnik 41 (1939) 9, S. 126-135
- /11/ Cammerer, C.; Achtziger, J.: Schätzungsweise Bestimmung des Feuchtigkeitseinflusses auf die Wärmeleitzahl von Bau - und Isolierstoffen. Chemie - Ing. - Technik 36 (1964) 5, S. 493-496

- /12/ Crank, J.: The Mathematics of Diffusion. Oxford 1964
- /13/ Crank, J.; Nicolson, P.: A Practical Method for Numerical Evaluation of Solutions of Partial Differential Equations of the Heat - Conduction Type.
Proceedings of the Cambridge Philosophical Society 43 (1947), S. 50-67
- /14/ Curry, D.M.; Cox, J.E.: The Effect of the Porous Material Characteristics on the Internal Heat and Mass Transfer
ASME - AIChE Heat Transfer Conference, Atlanta 1973
- /15/ Deliiski, N.: Berechnung der instationären Temperaturverteilung im Holz bei der Erwärmung durch Wärmeleitung, Teil 1 ,
Holz als Roh - und Werkstoff 35 (1977), S. 141-145
- /16/ DIN 4102: Brandverhalten von Bauteilen. Ausgabe 1977
- /17/ DIN 18230: Baulicher Brandschutz im Industriebau. Entwurf 1969
- /18/ DIN 52183: Prüfung von Holz: Bestimmung des Feuchtigkeitsgehalts
Ausgabe 1977
- /19/ Dolezal, R.; Dobbernack, R.; Hoffmann, F.: Arbeitsbericht des Teilprojektes C1 im Sonderforschungsbereich 148 - Brandverhalten von Bauteilen - für den Zeitraum 1975 - 1978 . Braunschweig 1978
- /20/ Domanský, R.; Rendos, F.: Zum Studium der Pyrolyse des Holzes und seiner Komponenten. Holz als Roh - und Werkstoff 20 (1962) 12, S. 473-476
- /21/ Dunlap, F.: The Specific Heat of Wood. U.S.Department of Agriculture, Forest Service, Bulletin No.110, 1912
- /22/ Ehm, H.; Arnault, P.: Untersuchung mit natürlichen Bränden im kleinen Versuchshaus in Metz. Europäische Konvention der Stahlbauverbände, Oktober 1969
- /23/ Eckert, E.R.G.: Einführung in den Wärme - und Stoffaustausch.
Berlin / Heidelberg / New York 1966

- /24/ Eickner, A.W.: Basic Research on the Pyrolysis and Combustion of Wood. Forest Products Journal 12 (1962) 4, S. 194-199
- /25/ Fengel, D.: Das Verhalten der Cellulose im Fichtenholz bei thermischer Behandlung. Holz als Roh - und Werkstoff 25 (1967) 3, S. 102-111
- /26/ Forchheimer, P.: Wasserbewegung durch Boden. VDI - Zeitschrift 45 (1901), S. 1781-1788
- /27/ Fritz, W.; Moser, H.: Spezifische Wärme, Wärmeleitfähigkeit und Temperaturleitfähigkeit von Steinkohle, Holzkohle und Koks. Feuerungstechnik 28 (1940) 5, S. 97-107
- /28/ Grassmann, P. : Physikalische Grundlagen der Verfahrenstechnik. Aarau / Frankfurt/Main 1970
- /29/ Green, L.; Duwez, P.: Fluid Flow through Porous Metals. Journal of Applied Mechanics 73 (1951), S. 39-45
- /30/ Griffiths, E.; Kaye, G.W.C.: The Measurement of Thermal Conductivity. Proceedings of the Royal Society, Ser.A., London 104 (1923) S. 71-98
- /31/ Gumz, W.: Kurzes Handbuch der Brennstoff - und Feuerungstechnik Berlin / Göttingen / Heidelberg 1962
- /32/ Hashemi, H.T.: Heat Conduction with Change of Phase . Dissertation, Norman / Oklahoma 1965
- /33/ Havens, J.A.; Hashemi, H.T.; Brown, L.E.; Welker, J.R.: A Mathematical Model of the Thermal Decomposition of Wood. Combustion Science and Technology 5 (1972), S. 91-98
- /34/ Havens, J.A.: Thermal Decomposition of Wood. Dissertation, Norman / Oklahoma 1969
- /35/ Heinrich, H.J.; Kaesche - Krischer, B.: Beitrag zur Aufklärung der Selbstentzündung von Holz. Brennstoff-Chemie 43 (1962) 5, S. 142-148

- /36/ HMSt0: Fire Research 1963. London 1963
- /37/ Jakob, M.: Die Wärmeleitfähigkeit von Holz. Der Chemie-Ingenieur, Bd.I (Eucken /Jakob), Leipzig 1933, S.335-336
- /38/ Jakob, M.: Wärmeleitfähigkeit trockener und feuchter Hölzer. Gesundheits-Ingenieur 57 (1934) 6, S.70
- /39/ Jayme, G.; Blischnok, B.: Über die chemische Zusammensetzung der verschiedenen Anteile des Kiefernholzes. Holz als Roh - und Werkstoff 1 (1938) 14, S. 538-543
- /40/ Kanury, A.M.: Rate of Burning of Wood. Combustion Science and Technology 5 (1972), S. 135-146
- /41/ Kanury, A.M.; Blackshear, P.L.: Some Considerations Pertaining to the Problem of Wood-Burning. Combustion Science and Technology 1 (1970), S. 339-355
- /42/ Kansa, E.J.; Perlee, H.E.; Chaiken, R.F.: Mathematical Model of Wood Pyrolysis Including Internal Forced Convection. Combustion and Flame 29 (1977), S. 311-324
- /43/ Katz, J.R.: Die Gesetze der Quellung. Kolloidchemische Beihefte 8 (1916)
- /44/ Keller, H.B.: Some Computational Problems in Boundary-Layer Flows. Lecture Notes in Physics, 35 , Proc. Fourth Int. Conf. Numerical Meth. Fluid Dynamics, Berlin / Heidelberg / New York 1975
- /45/ Koh, J.C.Y.; del Casal, E.: Heat and Mass Flow Through Porous Matrices for Transpiration Cooling. Proceedings of the Heat Transfer and Fluid Mechanics Institute 18 (1965), S. 263-281
- /46/ Kisseloff, P.: Feuchtigkeitsbewegung und Wärmeleitung im Holz. Holz als Roh - und Werkstoff 27 (1969) 7, S. 245-253
- /47/ Kollmann, F.: Über die wärmetechnischen Eigenschaften der Hölzer. Der Gesundheits-Ingenieur 57 (1934) 18, S. 224-227

- /48/ Kollmann, F.: Der Wärmeverbrauch bei der künstlichen Holz Trocknung. Archiv für Wärmewirtschaft und Dampfkesselwesen 16 (1935) 12, S. 329-335
- /49/ Kollmann, F.: Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe, Bd. I. Berlin / Göttingen / Heidelberg 1951
- /50/ Kollmann, F.; Malmquist, L.: Untersuchungen über das Strahlungsverhalten trocknender Hölzer. Holz als Roh- und Werkstoff 13 (1955) 7, S. 249-258
- /51/ Kollmann, F.; Malmquist, L.: Über die Wärmeleitfähigkeit von Holz und Holzwerkstoffen. Holz als Roh- und Werkstoff 14 (1956) 6, S. 201-204
- /52/ Kollmann, F.: Über die Sorption von Holz und ihre exakte Bestimmung. Holz als Roh- und Werkstoff 17 (1959) 5, S. 165-170
- /53/ Kollmann, F.: Zur Theorie der Sorption. Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens 29 (1963) 2, S. 33-41
- /54/ Kollmann, F.; Schneider, A.; Serrand, W.: Untersuchungen über den Einfluß der Abmessungen und von Feuchtigkeitsschutzbehandlungen von Holzteilen auf die Geschwindigkeit der Feuchtigkeitsänderungen im Konstantklima und auf die Feuchtigkeitsschwankungen im natürlichen Wechselklima. Köln / Opladen 1966
- /55/ Kollmann, F.; Côté, W.A.: Principles of Wood Science and Technology. Berlin / Heidelberg / New York 1968
- /56/ Krischer, O.: Wärme-, Flüssigkeits- und Dampfbewegung bei der Trocknung poriger Stoffe. VDI-Zeitschrift, Beiheft Verfahrenstechnik Nr. 1, 1940
- /57/ Krischer, O.; Rohalter, H.: Wärmeleitung und Dampfdiffusion in feuchten Gütern. VDI-Forschungsheft 402, Berlin 1940
- /58/ Krischer, O.: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik. 2. Auflage, Berlin / Göttingen / Heidelberg 1963

- /59/ Kübler, H.: Studium über die Holzfeuchtebewegung. Holz als Roh- und Werkstoff 15 (1957) 11, S. 453-468
- /60/ Kühlmann, G.: Untersuchung der thermischen Eigenschaften von Holz und Spanplatten in Abhängigkeit von Feuchtigkeit und Temperatur im hygroskopischen Bereich. Holz als Roh- und Werkstoff 20 (1962) 7, S. 259-270
- /61/ Kung, H.-C.: A Mathematical Model of Wood Pyrolysis. Combustion and Flame 18 (1972), S. 185-195
- /62/ Kung, H.-C.; Kalelkar, A.S.: On the Heat of Reaction in Wood Pyrolysis. Combustion and Flame 20 (1973), S. 91-103
- /63/ Lee, C.K.; Chaiken, R.F.; Singer, J.M.: Charring Pyrolysis of Wood in Fires by Laser Simulation. 16. Symposium (Int.) on Combustion, Pittsburgh 1976, S. 1457-1470
- /64/ MacLean, J.D.: Thermal Conductivity of Wood. Heating, Piping and Air Conditioning 13 (1941), S. 380-390
- /65/ Maku, T.: Studies on the Heat Conduction in Wood. Wood Research Bull. No. 13, Kyoto, Japan
- /66/ Manegold, E.: Kapillarsysteme, Bd.1. Heidelberg 1955, S. 143
- /67/ Midgeley, M.B.: Some Thermal Characteristics of Certain Types of Wood. Proceedings of the Leeds Philosophical Society, Scientific Section 5 (1947) 1, S. 33-59
- /68/ Mitchel, R.L.; Seborg, R.M.; Millet, M.A.: Effect on the Properties and Chemical Composition of Douglas-Fir Wood and its Major Components. Journal of Forest Products Research Society 38 (1953) 3,4
- /69/ Muskat, M.: The Flow of Homogeneous Fluids Through Porous Media. Ann Arbor, Michigan 1946

- /70/ Narayanamurty, D.: Versuche über die Feuchtigkeitsbewegung in Holz und anderen Körpern beim Trocknen und über das Wärmeleitvermögen feuchten Holzes. VDI-Zeitschrift, Beiheft Verfahrenstechnik Nr.2, 1936, S. 13-23
- /71/ NBS: Tables of Thermodynamic and Transport Properties. Oxford / London / New York / Paris 1960
- /72/ Panton, R.L.; Rittmann, J.G.: Pyrolysis of a Slab of Porous Material. 12. Symposium (Int.) on Combustion, Pittsburgh, 1969, S. 881-891
- /73/ Patzak, W.: Zur Theorie des Brandgeschehens von Holz. VDI-Forschungsheft 552, Düsseldorf 1972
- /74/ Raczkowski, J.; Stempień, C.: Zur Beziehung zwischen der Rohdichte und der Reindichte von Holz. Holz als Roh- und Werkstoff 25 (1967) 10, S. 380-383
- /75/ Rittmann, J.G.: A Computer Study of the Pyrolysis of Porous Solids Dissertation, Oklahoma 1970
- /76/ Roberts, A.F.: A Review of Kinetics Data for the Pyrolysis of Wood and Related Substances. Combustion and Flame 14 (1970), S. 261-272
- /77/ Roberts, A.F.; Clough, G.: Thermal Decomposition of Wood in an Inert Atmosphere. 9. Symposium (Int.) on Combustion, Pittsburgh 1963, S. 158-166
- /78/ Rolf, A.: Untersuchung des dynamischen Meßfehlers bei der Messung von Temperaturfeldern in Fichtenholz mit Thermoelementen. Studienarbeit, Institut für Wärme- und Brennstofftechnik, TU Braunschweig 1977
- /79/ Rowley, F.B.: The Heat Conductivity of Wood at Climatic Temperature Differences. Transactions of the American Society of Heating and Ventilating Engineers 39 (1933), S. 329-356

- /80/ Sachs, L.: Angewandte Statistik. Berlin / Heidelberg / New York 1974
- /81/ Sandermann, W.; Augustin, H.: Chemische Untersuchung des Zersetzungsablaufs. Holz als Roh- und Werkstoff 22 (1964) 10, S. 377-386
- /82/ Schmidt, E.: Das Differenzenverfahren zur Lösung von Differentialgleichungen der nichtstationären Wärmeleitung, Diffusion und Impulsausbreitung. Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens 13 (1942) 5, S. 177-185
- /83/ Seekamp, H.; Becker, W.: Modelluntersuchungen. Forschungsbericht Nr. 5, Arbeitsgemeinschaft Feuerschutz (AGF), Karlsruhe 1966
- /84/ Smith, D.N.; Lee, E.: The Longitudinal Permeability of Some Hardwoods and Softwoods. Forest Products Research, Special Report No.13, HMStO, London 1958
- /85/ Smith, G.D.: Numerische Lösung von partiellen Differentialgleichungen. Braunschweig 1970
- /86/ Stamm, A.J.; Loughborough, W.K.: Thermodynamics of the Swelling of Wood. Journal of Physical Chemistry 39 (1935), S. 121-132
- /87/ Stamm, A.J.: Calculation of the Void Volume in Wood. Industrial and Engineering Chemistry 30 (1938) 11, S. 1280-1281
- /88/ Stamm, A.J.: Thermal Degradation of Wood and Cellulose. Industrial and Engineering Chemistry 48 (1956), S. 413-417
- /89/ Stamm, A.J.: Wood and Cellulose Science. New York 1964
- /90/ Tang, W.K.; Neill, W.K.: Effect of Flame Retardants on Pyrolysis and Combustion of -Cellulose. Journal of Polymer Science, Part C (1964), S. 65-81
- /91/ Timell, T.E.: Veröffentlicht in /55/

- /92/ Tinney, R.: The Combustion of Wooden Dowels in Heated Air.
10. Symposium (Int.) on Combustion, Pittsburgh 1965, S. 925-930
- /93/ Topf, P.: Untersuchungen über die thermische Zersetzung von Holz
in oxidierender Atmosphäre bei Temperaturen bis 180 °C.
Dissertation, TU München 1970
- /94/ Trendelenburg, R.: Über Fasersättigungsfeuchtigkeit, Schwindmaß
und Raumdichte zahl wichtiger Holzarten. Holz als Roh- und Werk-
stoff 2 (1939) 1, S. 12-17
- /95/ Tsoumis, G.: Untersuchungen über die Schwankungen des Feuchtig-
keitsgehaltes von luftgetrocknetem Holz. Holz als Roh- und Werk-
stoff 18 (1960) 11, S. 415-422
- /96/ VDI: VDI-Wärmeatlas, Düsseldorf 1977
- /97/ Voigt, H.; Krischer, O.; Schauss, H.: Die Feuchtigkeitsbewegung
bei der Verdunstungstrocknung von Holz. Holz als Roh- und Werk-
stoff 3 (1940) 10, S. 305-321
- /98/ Vorreiter, L.: Die Holzquellung als Funktion mehrerer veränder-
licher Faktoren insbesondere der Temperatur und der Holzabmessung.
Holz als Roh- und Werkstoff 13 (1955) 8, S. 301-312
- /99/ Wangaard, F.F.: Transverse Heat Conductivity of Wood. Heating,
Piping and Air Conditioning 12 (1940) 7, S. 459-464
- /100/ Weatherford, W.D.; Sheppard, D.M.: Basic Studies of the Mecha-
nism of Ignition of Cellulosic Materials. 10. Symposium (Int.)
on Combustion, Pittsburgh 1965, S. 897-910
- /101/ Widell, T.: Thermal Investigation into Carbonization of Wood.
Acta Polytechnica, Chemical and Metallurgical Series 1 (1949),
S. 35

8. Anhang

Ortsko- ordinate	Temperatur	Volumenanteil		Gasdichte	Feuchtig- keit	Geschwin- digkeit	Dampf- gehalt	Wärmestrom bei Kondensation
x	ϑ	ϵ_f	ϵ_g	ρ_g	u	v	x_D	$\dot{q}_{\text{Kond.}}$
mm	$^{\circ}\text{C}$			kg/m^3		10^4 m/s		$\text{kJ/m}^2 \text{ s}$
0	138.4	0.283	0.717	0.879	0.0	-0.526	0.0	0.0
1	93.5	0.283	0.705	1.065	0.0363	-0.328	0.0	0.0
2	64.6	0.283	0.705	1.206	0.0363	-0.211	0.0	0.0
3	50.0	0.283	0.705	1.305	0.0363	-0.139	0.0	0.0
4	36.9	0.283	0.705	1.37	0.0363	-0.093	0.0	0.0
5	31.5	0.283	0.705	1.41	0.0363	-0.063	0.0	0.0
6	28.9	0.283	0.705	1.431	0.0363	-0.042	0.0	0.0
7	27.7	0.283	0.705	1.443	0.0363	-0.029	0.0	0.0
8	27.3	0.283	0.705	1.45	0.0363	-0.02	0.0	0.0
9	27.1	0.283	0.705	1.454	0.0363	-0.014	0.0	0.0
10	27.0	0.283	0.705	1.456	0.0363	-0.009	0.0	0.0
11	27.0	0.283	0.705	1.458	0.0363	-0.006	0.0	0.0
12	27.0	0.283	0.705	1.459	0.0363	-0.004	0.0	0.0
13	27.0	0.283	0.705	1.46	0.0363	-0.003	0.0	0.0
14	27.0	0.283	0.705	1.46	0.0363	-0.003	0.0	0.0
15	27.0	0.283	0.705	1.46	0.0363	-0.002	0.0	0.0
16	27.0	0.283	0.705	1.46	0.0363	-0.002	0.0	0.0
17	27.0	0.283	0.705	1.461	0.0363	-0.002	0.0	0.0
18	27.0	0.283	0.705	1.462	0.0363	-0.002	0.0	0.0
19	27.0	0.283	0.705	1.462	0.0363	-0.002	0.0	0.0
20	27.0	0.283	0.705	1.463	0.0363	0.0	0.0	0.0

Tabelle 8.1: Anfangsverteilung der Eingabegrößen für 410 $^{\circ}\text{C}$ und 3.6 Gew.-% Feuchtigkeit

Ortsko- ordinate	Temperatur	Volumenanteil		Gasdichte	Feuchtig- keit	Geschwin- digkeit	Dampf- gehalt	Wärmestrom bei Kondensation
x	ϑ	Feststoff ϵ_f	Gas ϵ_g	ρ_g	u	v	x_D	$\dot{q}_{\text{Kond.}}$
mm	$^{\circ}\text{C}$			kg/m^3		10^4 m/s		$\text{kJ/m}^2 \text{ s}$
0	152.5	0.279	0.721	0.848	0.0	-0.99	0.0	0.0
1	82.2	0.279	0.689	1.1	0.093	-0.543	0.0	0.0
2	53.0	0.279	0.689	1.246	0.093	-0.361	0.0	0.0
3	40.0	0.279	0.689	1.329	0.093	-0.259	0.0	0.0
4	34.6	0.279	0.689	1.376	0.093	-0.193	0.0	0.0
5	32.8	0.279	0.689	1.401	0.093	-0.146	0.0	0.0
6	32.2	0.279	0.689	1.417	0.093	-0.11	0.0	0.0
7	32.1	0.279	0.689	1.428	0.093	-0.083	0.0	0.0
8	32.0	0.279	0.689	1.435	0.093	-0.061	0.0	0.0
9	32.0	0.279	0.689	1.441	0.093	-0.045	0.0	0.0
10	32.0	0.279	0.689	1.445	0.093	-0.032	0.0	0.0
11	32.0	0.279	0.689	1.448	0.093	-0.023	0.0	0.0
12	32.0	0.279	0.689	1.45	0.093	-0.017	0.0	0.0
13	32.0	0.279	0.689	1.451	0.093	-0.013	0.0	0.0
14	32.0	0.279	0.689	1.452	0.093	-0.011	0.0	0.0
15	32.0	0.279	0.689	1.453	0.093	-0.01	0.0	0.0
16	32.0	0.279	0.689	1.454	0.093	-0.01	0.0	0.0
17	32.0	0.279	0.689	1.455	0.093	-0.009	0.0	0.0
18	32.0	0.279	0.689	1.456	0.093	-0.007	0.0	0.0
19	32.0	0.279	0.689	1.457	0.093	-0.004	0.0	0.0
20	32.0	0.279	0.689	1.457	0.093	0.0	0.0	0.0

Tabelle 8.2: Anfangsverteilung der Eingabegrößen für 410 $^{\circ}\text{C}$ und 9.3 Gew.-% Feuchtigkeit

Ortsko- ordinate	Temperatur	Volumenanteil		Gasdichte	Feuchtig- keit	Geschwin- digkeit	Dampf- gehalt	Wärmestrom bei Kondensation
x	ϑ	ϵ_f	ϵ_g	ρ_g	u	v	x_D	$\dot{q}_{Kond.}$
mm	$^{\circ}\text{C}$			kg/m^3		10^4 m/s		$\text{kJ/m}^2 \text{ s}$
0	332.2	0.257	0.743	0.597	0.0	-19.859	0.0	0.0
1	198.3	0.283	0.717	1.465	0.0	- 7.74	0.0	0.0
2	100.0	0.286	0.704	3.004	0.04	7.365	0.938	4670.6
3	79.6	0.286	0.702	2.084	0.044	1.13	0.0	0.0
4	51.1	0.286	0.705	2.085	0.0363	1.115	0.0	0.0
5	38.7	0.286	0.705	1.989	0.0363	0.987	0.0	0.0
6	33.7	0.286	0.705	1.862	0.0363	0.807	0.0	0.0
7	31.9	0.286	0.705	1.742	0.0363	0.625	0.0	0.0
8	31.3	0.286	0.705	1.644	0.0363	0.469	0.0	0.0
9	31.1	0.286	0.705	1.57	0.0363	0.347	0.0	0.0
10	31.1	0.286	0.705	1.513	0.0363	0.253	0.0	0.0
11	31.1	0.286	0.705	1.472	0.0363	0.18	0.0	0.0
12	31.0	0.286	0.705	1.443	0.0363	0.123	0.0	0.0
13	31.0	0.286	0.705	1.423	0.0363	0.084	0.0	0.0
14	31.0	0.286	0.705	1.41	0.0363	0.054	0.0	0.0
15	31.0	0.286	0.705	1.4	0.0363	0.033	0.0	0.0
16	31.0	0.286	0.705	1.395	0.0363	0.02	0.0	0.0
17	31.0	0.286	0.705	1.392	0.0363	0.011	0.0	0.0
18	31.0	0.286	0.705	1.39	0.0363	0.006	0.0	0.0
19	31.0	0.286	0.705	1.389	0.0363	0.003	0.0	0.0
20	31.0	0.286	0.705	1.389	0.0363	0.0	0.0	0.0

Tabelle 8.3: Anfangsverteilung der Eingabegrößen für 708 $^{\circ}\text{C}$ und 3.6 Gew.-% Feuchtigkeit

<https://doi.org/10.24355/dbbs.084-201904081146-0>

Ortsko- ordinate	Temperatur	Volumenanteil		Gasdichte	Feuchtig- keit	Geschwin- digkeit	Dampf- gehalt	Wärmestrom bei Kondensation
x	ϑ	Feststoff ϵ_f	Gas ϵ_g	ρ_g	u	v	x_D	$\dot{q}_{\text{Kond.}}$
mm	$^{\circ}\text{C}$			kg/m^3		10^4 m/s		$\text{kJ/m}^2 \text{ s}$
0	425.7	0.079	0.921	0.517	0.0	-11.37	0.0	0.0
1	183.0	0.279	0.721	0.863	0.0	- 5.892	0.0	0.0
2	86.3	0.287	0.682	1.592	0.115	- 2.554	0.0	0.0
3	51.8	0.286	0.689	1.987	0.093	- 1.582	0.0	0.0
4	37.1	0.286	0.689	2.222	0.093	- 0.997	0.0	0.0
5	32.5	0.286	0.689	2.345	0.093	- 0.595	0.0	0.0
6	31.2	0.286	0.689	2.407	0.093	- 0.301	0.0	0.0
7	31.2	0.286	0.689	2.436	0.093	- 0.088	0.0	0.0
8	31.1	0.286	0.689	2.444	0.093	0.053	0.0	0.0
9	31.1	0.286	0.689	2.439	0.093	0.134	0.0	0.0
10	31.1	0.286	0.689	2.427	0.093	0.168	0.0	0.0
11	31.1	0.286	0.689	2.412	0.093	0.168	0.0	0.0
12	31.1	0.286	0.689	2.397	0.093	0.148	0.0	0.0
13	31.1	0.286	0.689	2.384	0.093	0.119	0.0	0.0
14	31.1	0.286	0.689	2.373	0.093	0.088	0.0	0.0
15	31.1	0.286	0.689	2.365	0.093	0.06	0.0	0.0
16	31.1	0.286	0.689	2.36	0.093	0.037	0.0	0.0
17	31.1	0.286	0.689	2.357	0.093	0.021	0.0	0.0
18	31.1	0.286	0.689	2.355	0.093	0.011	0.0	0.0
19	31.1	0.286	0.689	2.354	0.093	0.004	0.0	0.0
20	31.1	0.286	0.689	2.353	0.093	0.0	0.0	0.0

Tabelle 8.4: Anfangsverteilung der Eingabegrößen für 708 $^{\circ}\text{C}$ und 9.3 Gew.-% Feuchtigkeit

LEBENS LAUF

Frank Paul Eberhard H o f f m a n n, geboren am 23.09.1946 in
Holzminden, verheiratet, ein Sohn.

SCHULBESUCH

Ostern 1953 - Ostern 1957	Grundschule in Braunschweig
Ostern 1957 - Februar 1966	Theodor-Heuss-Gymnasium in Wolfenbüttel
14.02.1966	Reifeprüfung im mathematisch-naturwissen- schaftlichen Zweig

WEHRDIENST

4.4.1966 - 30.09.1967

PRAKTIKUM

Vor,während und nach dem Wehrdienst	MIAG, Braunschweig; Gebr. Welger, Wolfenbüttel;
Während des Studiums	AEG-Telefunken, Berlin; MIAG, Braunschweig

STUDIUM

WS 1967/68 - SS 1970	Studium des Maschinenbaus an der Tech- nischen Hochschule Darmstadt
18.12.1970	Diplom-Vorprüfung
WS 1970/71 - SS 1973	Studium der Fachrichtung "Wärme-,Verfahrens und Reaktortechnik" an der Technischen Uni- versität Carolo Wilhelmina Braunschweig
4.10.1973	Diplom-Hauptprüfung

BERUFLICHE TÄTIGKEIT

Ab 1.11.1973	Wissenschaftlicher Mitarbeiter im Sonder- forschungsbereich 148 unter der Projekt- leitung von Prof. Dr.techn.R.Dolezal am Institut für Wärme- und Brennstofftechnik der Technischen Universität Braunschweig
--------------	---

WÄHREND DIESER TÄTIGKEIT

WS 1976/77 - SS 1978	Lehrauftrag an der Fachhochschule Braun- schweig-Wolfenbüttel im Fachbereich - Ver- sorgungstechnik
----------------------	---

